

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

RAPPORT PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES ET GÉNIE
DES MATÉRIAUX LIGNOCELLULOSIQUES

PAR
JULES A. LAUZON, ING.

OPTIMISATION DE LA TECHNIQUE D'ÉLECTROCOAGULATION
POUR LA RÉCOLTE DE LA BIOMASSE ALGALE POUR LA PRODUC-
TION DE BIOPÉTROLE

AOÛT 2018

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

Cet essai (2^e ou 3^e cycle) ou mémoire a été dirigé par :



Simon Barnabé, directeur de recherche, Ph.D.

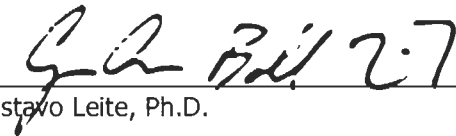
UQTR

Jury d'évaluation de l'essai ou du mémoire :



Nathalie Bourdeau, M.Sc.

Cégep de Trois-Rivières (Innofibre)



Gustavo Leite, Ph.D.

Université Sainte-Anne

Avant-propos

Depuis 2010, la Chaire de recherche industrielle en environnement et biotechnologie (CRIEB) de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR) a entrepris des travaux majeurs de recherche sur la production de microalgues en cohabitation avec des usines de différents secteurs industriels. La production de microalgues comporte de nombreux défis dont celui de réduire les coûts de l'étape de la récolte et de la déshydratation de la biomasse algale afin de la valoriser. Ce projet de maîtrise porte sur cette étape et propose la technique d'électrocoagulation pour réduire les coûts.

Remerciements

Un intérêt marqué pour les énergies renouvelables m'a conduit à entreprendre un diplôme sur la valorisation de la biomasse à l'UQTR. La qualité des professeurs et la pertinence du contenu du cours m'ont encouragé à poursuivre mes études vers cette maîtrise et qui sait, au-delà. Je tiens en premier lieu à remercier mon directeur de recherche, le professeur Simon Barnabé, de m'avoir impliqué dans des projets de recherches en mettant à profit mon expérience dans l'industrie de la chimie. Son leadership et ses connaissances m'ont convaincu d'étudier la biomasse algale en vue de la production de biocarburants. Son dynamisme et sa vision ont été une grande source d'inspiration et de motivation dans la réalisation de ce projet de maîtrise. Dès le début de ce projet de recherche, il a su définir les cibles à atteindre et concentrer mon attention sur les points importants. Au départ, j'ai été accueilli dans l'équipe de la CRIEB, supporté et conseillé par mes collègues. Je tiens, en particulier, à exprimer ma reconnaissance à Benjamin Boëns, stagiaire postdoctoral de la CRIEB, pour son soutien constant et ses judicieux conseils. Mes remerciements vont aussi à l'attention de : 1) professeur Éric Loranger pour la coordination administrative; 2) professeur Daniel Montplaisir qui m'a permis d'utiliser son laboratoire et ses connaissances; 3) Mlle Nathalie Bourdeau, chercheuse chez Innofibre, pour sa précieuse collaboration, ses conseils et l'approvisionnement en microalgues utilisées pour cette recherche.

Enfin, un merci tout spécial est adressé à ma famille pour l'intérêt qu'elle a démontré tout au long de mes études; leur soutien a été une grande source de motivation et de ressourcement jusqu'à la réalisation.

Résumé

Le projet de maîtrise consiste à appliquer une technologie d'électrocoagulation pour récolter et déshydrater une biomasse de microalgues. Les étapes de récolte et de déshydratation sont un goulot d'étranglement dans le secteur de la production de microalgues en raison de leur coût et leur consommation énergétique élevés. Parmi les nouvelles technologies disponibles pour s'attaquer à ce problème, l'électrocoagulation s'avère prometteuse en termes de coût et d'efficacité. Des recherches ont donc été entreprises avec cette technologie sur des biomasses de microalgues produites à l'Université du Québec à Trois-Rivières dans le cadre de projets de recherche subventionnés.

Les résultats ont démontré que l'électrocoagulation est un procédé efficace de récolte et de déshydratation de la biomasse de microalgues. La concentration initiale de la culture au-delà d'une densité moyenne a peu d'influence sur la densité de la récolte. La conductivité du bouillon de culture a atteint un minimum après 15 minutes de traitement. Au-delà de cette période il y a très peu de flottation additionnelle de microalgues. Compte tenu que l'espacement des électrodes est fixe dans le réacteur et que l'intensité du courant induit a été ajusté à 10 ampères dans tous les tests; la récolte est donc optimum après 15 minutes de traitement. L'intégrité de la paroi cellulaire des microalgues a été maintenue suite à l'électrocoagulation. L'encrassement des électrodes et la contamination des eaux résiduelles et de la biomasse par les métaux de l'anode sacrificielle demeurent des éléments faibles du système. Le recyclage des eaux de procédé est recommandé et le jumelage avec un deuxième procédé tel que la filtration ou la centrifugation doit être envisagé pour maximiser les rendements de déshydratation.

Mots Clés

Microalgues, électrocoagulation, eaux usées, cohabitation, récolte, déshydratation.

Table des Matières

| | |
|--|-----|
| Avant-propos..... | i |
| Remerciements..... | iii |
| Résumé..... | v |
| Mots Clés..... | v |
| Table des Matières | vii |
| Liste des Figures | ix |
| Liste des Tableaux | xi |
| Liste des Abréviations..... | xii |
| Chapitre 1 - Introduction..... | 1 |
| 1.1 Contexte général de l'énergie | 1 |
| 1.1.1 Les réserves en énergies fossiles conventionnelles | 1 |
| 1.1.2 Évolution de la demande en énergie..... | 2 |
| 1.1.3 Réduction des émissions de gaz à effet de serre | 5 |
| 1.1.4 Les sources alternatives au pétrole | 6 |
| 1.2 Contribution des biomasses dans le bilan énergétique | 8 |
| 1.3 Microalgues et algoraffinage | 9 |
| 1.3.1 Souches de microalgues | 10 |
| 1.4 Culture de microalgues | 11 |
| 1.4.1 Photosynthèse et CO ₂ | 19 |
| 1.4.2 Cycle du CO ₂ et réduction des gaz à effet de serre | 19 |
| 1.4.3 Nutriments | 21 |
| 1.5 Récolte de la biomasse algale | 22 |
| 1.5.1 Technologies de base..... | 24 |
| 1.5.2 Technologies novatrices | 25 |
| 1.5.3 Origin Clear Inc. | 31 |

| | | |
|--|---|----|
| 1.6 | Traitement et conversion de la biomasse | 32 |
| 1.7 | Procédé RT Algae | 33 |
| 1.8 | But, hypothèses et objectifs de recherche | 35 |
| Chapitre 2 - Matériels et méthodes | | 37 |
| 2.1 | Méthodologie | 37 |
| 2.2 | Souches de microalgues et production de la biomasse algale..... | 37 |
| 2.2.1 | Consortium VERTECH..... | 37 |
| 2.2.2 | Algues filamenteuses indigènes..... | 40 |
| 2.3 | Cellule d'électrocoagulation EcothorMD..... | 41 |
| 2.4 | Décantation de la biomasse algale et prélèvement..... | 44 |
| 2.5 | Filtration avec aspiration sous vide partiel | 45 |
| Chapitre 3 - Résultats..... | | 47 |
| 3.1 | Paramètres | 47 |
| 3.2 | Récolte de la biomasse du consortium VERTECH | 47 |
| 3.3 | Récolte de biomasse du consortium d'algues filamenteuses indigènes..... | 50 |
| 3.4 | Utilisation de peroxyde d'hydrogène | 61 |
| 3.5 | Intégrité de la paroi cellulaire des algues..... | 62 |
| 3.6 | Temps de traitement | 63 |
| 3.7 | Période de décantation | 64 |
| 3.8 | Facteur énergie | 65 |
| Chapitre 4 - Conclusions..... | | 67 |
| 4.1 | Variation du voltage en fonction du temps de traitement | 67 |
| 4.2 | Influence de la concentration des nutriments | 67 |
| 4.3 | Intégrité de la paroi cellulaire des algues | 67 |
| 4.4 | Avantages et désavantages de l'électrocoagulation..... | 67 |
| 4.5 | Bilan économique | 68 |
| 4.6 | Perspectives | 68 |
| Bibliographie..... | | 71 |
| Annexe I À propos de la souche VERTECH et de son milieu de culture | | 77 |

Liste des Figures

| | | |
|-----------|--|----|
| Figure 1 | La consommation mondiale d'énergie (OCDE & AIE, 2010). | 1 |
| Figure 2 | Évolution de la demande en énergie (AIE/BP, 2016) | 3 |
| Figure 3 | Croissance de la population et de la demande d'énergie (AIE ,2016). | 4 |
| Figure 4 | Évolution de la consommation mondiale (AIE ,2016)..... | 4 |
| Figure 5 | Investissements totaux dans les énergies renouvelables..... | 8 |
| Figure 6 | Rendement comparé des biomasses (source : www.rncan.gc.ca/forets/industrie/bioproducts)..... | 9 |
| Figure 7 | Composition des microalgues les plus utilisées à l'échelle industrielle (Sapphire Energy, 2015). | 11 |
| Figure 8 | Installations de Sapphire Energy (source : www.sapphireenergy.com). | 15 |
| Figure 9 | Aquaculture Raceway Integrated Design (ARID) (source: AzCATI). | 16 |
| Figure 10 | Photobioréacteur tubulaire extérieur de Biofuel Systems (source : www.biopetroleo.com/france/ubicacion). | 17 |
| Figure 11 | Culture de microalgues en sacs (source : https://sservi.nasa.gov/articles/omega)..... | 17 |
| Figure 12 | Procédé de culture OMEGA (source : https://www.nasa.gov/centers/ames/research/OMEGA/index.html). | 18 |
| Figure 13 | Procédé à pulsion ultrasonique et chitosane. | 26 |
| Figure 14 | Cross-flow membrane modules assembled for field tests; 1,26m ² of membrane area, 1mm feed flow channel opening. | 27 |
| Figure 15 | Cellule typique avec anode d'aluminium. | 28 |
| Figure 16 | Réacteur Kaselco dans les installations du NAABB's à Pecos, Texas..... | 29 |
| Figure 17 | Usine pilote de OriginClear à Bakersfield. | 31 |
| Figure 18 | Foudrinier d'une machine à papier et microalgues déshydratées après un passage. | 34 |
| Figure 19 | Consortium VERTECH Chlorella sp.-bactéries | 38 |
| Figure 20 | Préparation initiale du bouillon de culture de microalgues en fioles et en aquarium..... | 39 |
| Figure 21 | Photobioréacteur artisanal de 400 litres et bassin pilote Alga- Fuel TM de 10 m ³ | 40 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figure 22 | Algues vertes filamenteuses indigènes (600x)..... | 41 |
| Figure 23 | Cellule de laboratoire Ecothor ^{MD} | 42 |
| Figure 24 | Algue filamenteuse et souche VERTECH..... | 45 |
| Figure 25 | Récolte avec la biomasse VERTECH sans et avec H ₂ O ₂ | 49 |
| Figure 26 | Microalgues filamenteuses indigènes dans le réacteur Algafuel TM | 50 |
| Figure 27 | Culture d'algues filamenteuses. | 52 |
| Figure 28 | Dépôt à l'anode et séparation de la biomasse après 30 minutes. | 52 |
| Figure 29 | Séparation de la biomasse après 60 minutes et séparation avec peroxyde. | 53 |
| Figure 30 | Culture concentrée de l'algue indigène (P-1) et collet de mousse formé après séparation (P-2). | 55 |
| Figure 31 | Séparation après 30 min (P-3), 45 min (P-4), sans traitement (P-5). | 55 |
| Figure 32 | Culture filamenteuse (P-1), dépôt d'anode (P-2), précipitation (P-3), séparation (P-4) et décantation naturelle (P-5). | 57 |
| Figure 33 | Consommation de l'anode par période d'électrocoagulation. | 60 |
| Figure 34 | Anode sacrificielle. | 60 |
| Figure 35 | Algues vertes filamenteuses indigènes. | 63 |
| Figure 36 | Variation du voltage en fonction du temps de traitement. | 64 |
| Figure 37 | Décantation après ECF (30 min) et séparation sans aide (30 min). | 65 |

Liste des Tableaux

| | | |
|------------|--|----|
| Tableau 1 | Rendement des méthodes de culture (Cadoret et Bernard, 2008). | 19 |
| Tableau 2 | Cycle du CO ₂ dans une culture de <i>Chlorella vulgaris</i> (Lam et Lee, 2013)..... | 20 |
| Tableau 3 | Comparaison des coûts des technologies de récolte et d'extraction (NAABB, 2013)..... | 24 |
| Tableau 4 | Sommaire de l'étude du NAABB, à l'échelle pré-commerciale, des sept meilleures alternatives de récolte (NAABB, 2013) | 30 |
| Tableau 5 | Récolte de la biomasse VERTECH. | 48 |
| Tableau 6 | Récolte de la biomasse VERTECH avec peroxyde | 48 |
| Tableau 7 | Comparaison du rendement de la récolte avec ajout ou non de peroxyde d'hydrogène. | 51 |
| Tableau 8 | Résultats avec les algues filamenteuses indigènes..... | 54 |
| Tableau 9 | Résultats avec les microalgues filamenteuses indigènes | 56 |
| Tableau 10 | Résultats des essais après E.C..... | 57 |
| Tableau 11 | Efficacité de la récolte (%) en fonction du temps de traitement ECF et la période de décantation (Vandamme et al., 2011). | 65 |

Liste des Abréviations

| | |
|----------|---|
| AC | Courant alternatif |
| AIE | Agence Internationale de l'Énergie |
| CIPP | Centre intégré en pâtes et papiers |
| COT | Carbone organique total |
| CRIEB | Chaire de recherche industrielle en environnement et biotechnologie de l'université du Québec |
| CTE | Centre des Technologies de l'Eau |
| DAF | Dissolved air flotation |
| DBO5 | Demande biochimique en oxygène pendant cinq jours |
| DC | Courant continu |
| DCO | Demande chimique en oxygène |
| DEL | Diode électroluminescente |
| DOE | United States Department of Energy |
| ECRO | Électrocoagulation-électroréduction-ozonation |
| EDTA | Acide éthylène diamine tétra acétique |
| EG | Eaux grises |
| H2O2 | Peroxyde d'hydrogène |
| HTL | Hydrothermal liquefaction |
| CHG | Catalytic Hydrothermal Gasification |
| KH | Constante d'équilibre d'hydratation |
| LEA | Lipid extracted algae |
| LET | Lieu d'enfouissement technique |
| NTU | Nephelometric Turbidity Unit |
| MES | Matière en suspension |
| mS.cm-1 | milli Siemens par centimètre |
| NAABB | National Alliance for Advanced Biofuels and Bioproducts |
| OCDE | Organisation de coopération et de développement |
| OMEGA | Offshore Membrane Enclosures for Growing Algae |
| PEL | Perte d'énergie parasite |
| pH | Potentiel hydrogène moyen |
| Struvite | Phosphate double d'ammonium et de magnésium hexahydraté de formule chimique $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ |
| TAG | Triacylglyceride |
| TEP | Tonne Équivalent Pétrole |

Chapitre 1 - Introduction

1.1 Contexte général de l'énergie

1.1.1 Les réserves en énergies fossiles conventionnelles

Nous sommes à un point tournant de notre histoire ; les ressources en énergie fossile sont en déclin, nos besoins alimentaires et en énergie augmentent au fur et à mesure de l'augmentation de la population mondiale et le développement accéléré des pays émergents tels que l'Inde et la Chine. La demande de ces pays augmentera en effet trois fois plus vite que celle des pays de la zone OCDE pour atteindre près de la moitié de la demande totale de pétrole à l'horizon 2030, contre 13% en 1970. La durée des réserves mondiales non renouvelables d'énergie conventionnelles connues (fossile et uranium), sont estimées à environ 81 ans au rythme de la production actuelle (Figure 1).

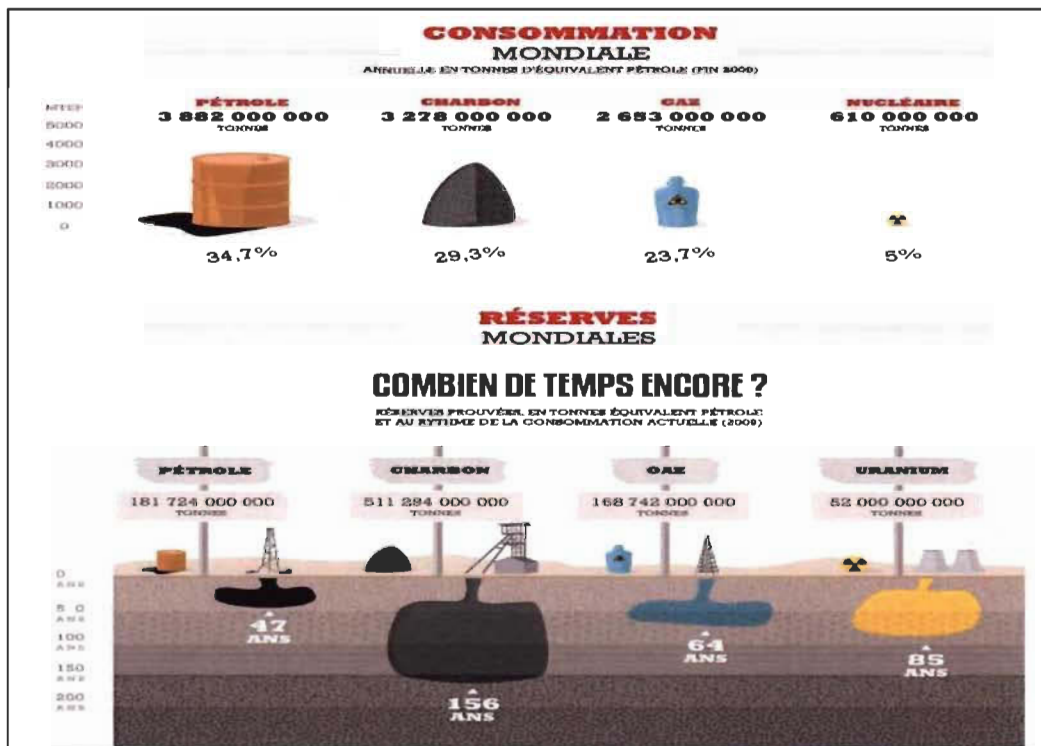


Figure 1 La consommation mondiale d'énergie (OCDE & AIE, 2010).

La production mondiale d'énergie commerciale et conventionnelle¹ était en 2015, de 13 306 millions de TEP (91,3% du bilan total) selon la pétrolière British Petroleum, soit :

- 85.6% en hydrocarbure (32,8 % de pétrole, 28,8 % de charbon, 24 % de gaz naturel);
- 4,4 % en nucléaire;
- 10 % d'énergies renouvelables (hydroélectricité 6,7 %, éolien 1,4 %, biomasse et géothermie 0,9 %, biocarburants 0,6 %, solaire 0,4 %).

À cela il faut aussi considérer les énergies directes telles que la combustion du bois, le coefficient de performance (COP) des pompes à chaleur, l'énergie solaire thermique, etc., qui selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) représentaient 8,7 % des énergies en 2015. Au bilan total dans la production d'énergie mondiale, la part des énergies renouvelables et des énergies directes est donc d'environ 17,8 % ($8,7\% + (10\% \times 91,3\%)$) soit un bond de près de 10% en 15 ans. Dans l'équation de l'offre et la demande, l'augmentation exponentielle des prix des énergies conventionnelles rendra, à court terme, les ressources non conventionnelles économiquement exploitables; la période de transition est estimée à 105 ans.

Parmi les ressources d'hydrocarbures fossiles non conventionnelles, nous trouvons :

- Les ressources d'hydrocarbures 'offshore' en profondeur (plus de 3 000 mètres), les pétroles de schistes, les sables bitumineux et les réserves subpolaires (105 ans de production);
- Les gaz de schistes, les gaz torchés et brûlés aux puits de pétrole, les gaz de charbon, le méthane des pergélisols et captif des glaces.

1.1.2 Évolution de la demande en énergie

Tout comme la sortie de l'âge de pierre dans l'évolution ne fut pas causée par un manque de roche, le remplacement des hydrocarbures par des énergies renouvelables se fera pour des raisons environnementales bien avant la disparition des ressources.

¹ On désigne comme « conventionnelle » une ressource que l'on peut extraire selon les moyens technologiques actuels et à un coût économiquement acceptable

Depuis la révolution industrielle, la consommation d'énergie a augmenté de 100% en 40 ans (AIE/BP, 2016). La croissance de la demande est le produit de l'augmentation constante de la population et de l'augmentation accélérée de la consommation per capita (Figure 2). L'augmentation de la consommation moyenne par habitant a été de 11% de 1970 à 2000 et elle sera selon les projections de 27% pour les trente prochaines années. Une croissance de près de 3 fois plus rapide est due à la répartition des richesses et du rééquilibrage du niveau de vie avec les pays en voie de développement.

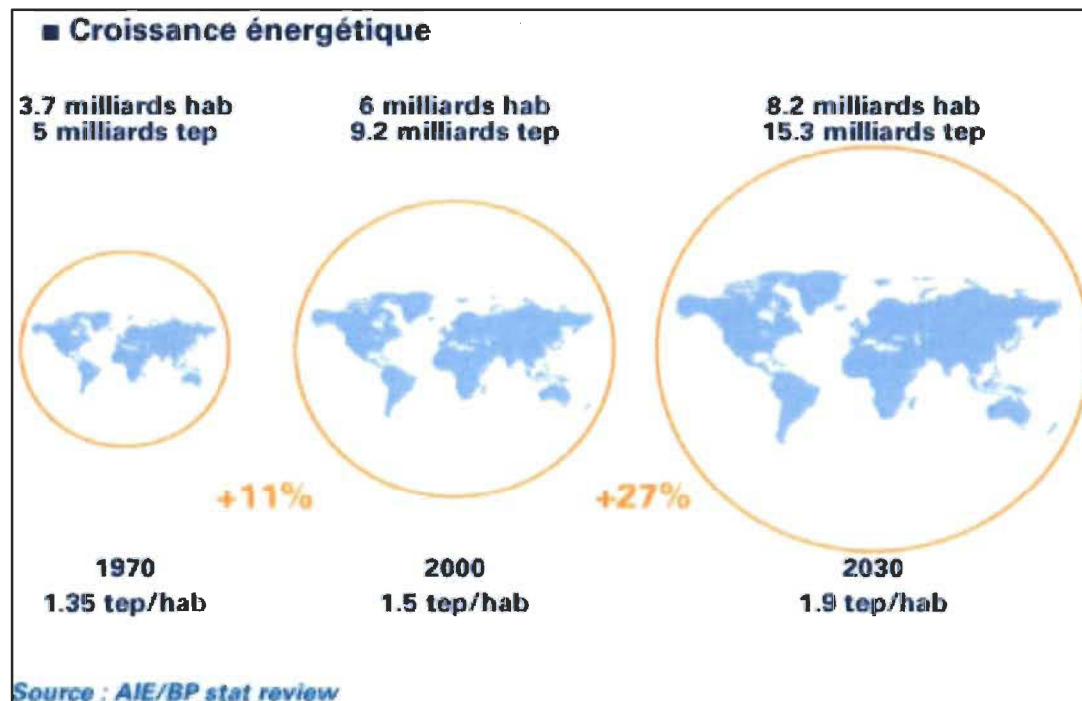


Figure 2 Évolution de la demande en énergie (AIE/BP, 2016)

Le facteur le plus important de la croissance de la demande est, comme indiqué sur la Figure 3, le rattrapage accéléré des pays en voie de développement. En soixante ans la population mondiale aura augmenté de $2\frac{1}{4}$ fois, la croissance de la demande per capita de près de $1\frac{1}{2}$ fois et la consommation énergétique mondiale finale, selon l'Agence internationale de l'énergie, de 3 fois. La répartition de la consommation par secteur d'activité est la suivante: industrie 29 %, transports 28 %, résidentiel 23 %, tertiaire 8 %, agriculture et pêche 2 %, pétrochimie et chimie 9 %.

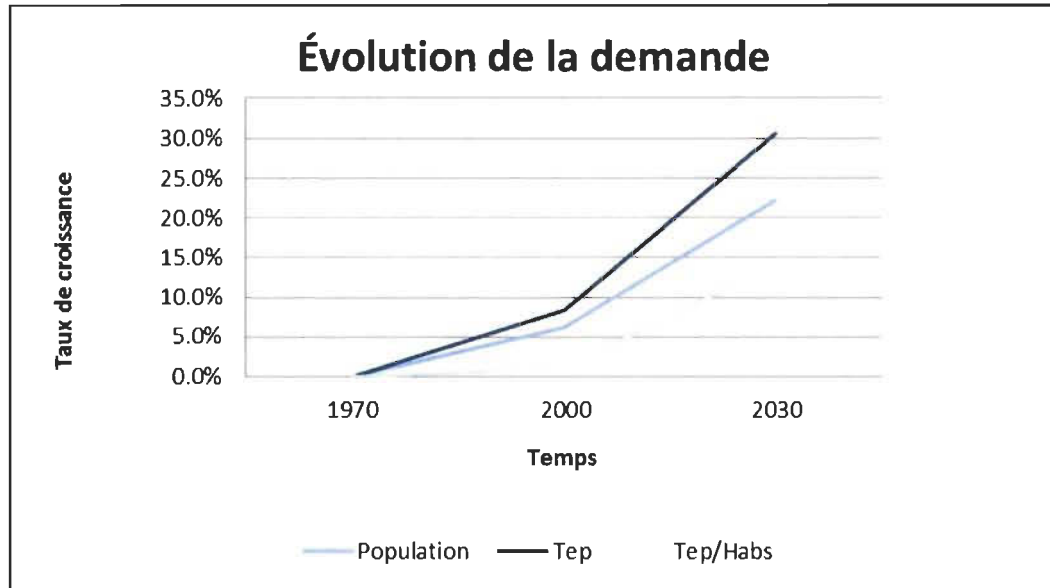


Figure 3 Croissance de la population et de la demande d'énergie (AIE ,2016).

Plus de 85% de la production d'énergie provient des hydrocarbures traditionnels et ce sera le cas pour encore plusieurs années. Par contre les énergies renouvelables, depuis une dizaine d'années, prennent de plus en plus de parts du marché et la tendance n'ira qu'en augmentant suivant les contraintes environnementales et l'augmentation des coûts de production des énergies traditionnelles (Figure 4).

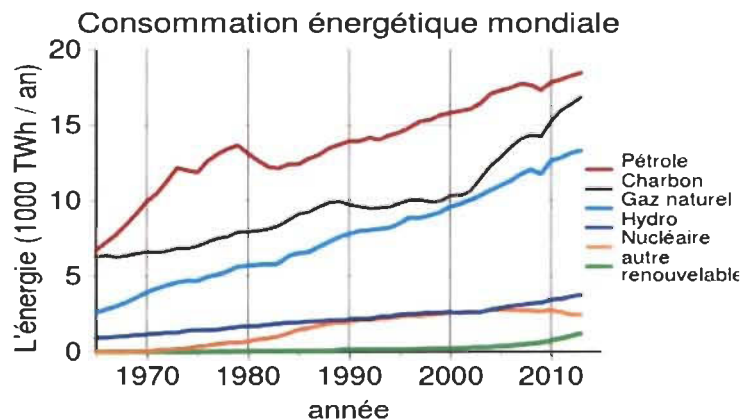


Figure 4 Évolution de la consommation mondiale (AIE ,2016).

Depuis le début des années 2000, le nucléaire est remplacé graduellement par les centrales au charbon et dans une moindre mesure par des énergies renouvelables. Les effets sur les émissions de gaz à effet de serre, malheureusement, en subissent les conséquences.

1.1.3 Réduction des émissions de gaz à effet de serre

Au rythme auquel nous émettons des gaz à effet de serre (GES) et que nous épuisons nos ressources, il est impératif de repenser à notre façon d'habiter cette planète. Au niveau mondial, selon l'AIE, les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), dues à la combustion des énergies fossiles, ont été de 32 381 Mt en 2014, en progression de 109 % depuis 1973. La combustion du charbon est responsable de 46 % des GES, suivie de 34 % par le pétrole et de 20 % par le gaz naturel. Les émissions de CO₂ par habitant en 2014 dans le monde sont estimées à 4,47 tonnes, 16,22 tonnes aux États-Unis, 8,93 tonnes en Allemagne, 4,32 tonnes en France, 6,66 tonnes en Chine, 1,56 tonne en Inde et 0,96 tonnes en Afrique. Force est de constater que le choix du combustible, déterminé par le prix de la ressource et le nivellement de la richesse avec les pays émergents auront un impact énorme sur les émissions de GES. L'Allemagne et le Japon qui remplacent leurs centrales nucléaires par des centrales au charbon, la Chine et l'Inde dont le PIB augmente deux fois plus rapidement que la moyenne des pays d'Europe et les États-Unis ne sont des exemples de cette mauvaise tendance. Tout en satisfaisant les besoins en énergie, nous devons réduire les rejets provenant de la combustion des hydrocarbures liquides et gazeux ainsi que ceux du charbon de 20% d'ici 2020 (Protocole de Kyoto), de 50% d'ici 2030 et de 80% en 2050.

L'importation de pétrole étranger étouffe les économies des pays importateurs les incitant à se libérer de la dépendance pétrolière et de se tourner vers le développement d'énergies indigènes. Au Québec, notre dépendance aux importations de gaz et de pétrole engendre un déficit de la balance commerciale de 13,7 milliards \$/année. Voilà l'occasion de se tourner vers la biomasse pour trouver de nouvelles sources de matières premières et d'énergie sans pour autant soustraire les terres arabes à la culture. Aux États-Unis, le Energy Independence and Security Act de 2007 définit les normes des carburants renouvelables ainsi qu'un calendrier d'implantation concernant l'utilisation de biocarburants. Avec une consommation de 9 milliards gallons US de biocarburants pour 2008, la consommation des États-Unis en biocarburant devrait se rendre à une production de 36 milliards de gallons en

2022. De cela, 16 milliards de gallons devront provenir de l'éthanol cellulosique². Les normes canadiennes sur les carburants imposeront un contenu de 5% d'éthanol d'ici 5 ans dans l'essence automobile. Une taxe de 19,2¢/litre sur l'essence et le mazout vendus au Québec est versée au fonds vert pour supporter la recherche et le développement d'énergies vertes et pour aider au financement des projets d'économie d'énergie.

1.1.4 Les sources alternatives au pétrole

La consommation des pays émergents augmentera, selon la projection des tendances observées, trois fois plus rapidement que celle des pays de la zone OCDE pour atteindre en 2030 près de 50% de la demande totale contre 13% en 1970. D'ici 2020, la Californie et le Québec se sont engagés à réduire de 20 % leurs émissions de gaz à effet de serre en passant par la structure d'un marché commun du carbone. Le protocole de Paris appelle à un effort encore plus grand de réduction qui, selon les experts conduira la bourse du carbone à des prix de 25¢ le litre pour l'achat de crédits. L'augmentation de la demande d'énergie et les impératifs environnementaux nous forcent à se tourner vers les biomasses pour trouver de nouvelles sources de matières premières et d'énergie renouvelable. La consommation d'énergie primaire du monde était, en 2011, de 12 millions tonnes de pétrole brut. Une fraction infime de cette consommation quotidienne mondiale était produite à partir des biocarburants renouvelables, soit 161 tonnes par jour.

Des investissements colossaux seront nécessaires pour faire la transition vers des énergies renouvelables. Il faudra que le coût de revient de ces énergies soit compétitif à celui des énergies traditionnelles pour justifier de tels investissements selon le PNUE. Soulignons aussi le fait suivant :

Le groupe Royal Dutch/Shell, dans un scénario de croissance soutenue, prévoyait il y a 10 ans que le marché de la biomasse se chiffrait à 150 milliard\$/an durant la première moitié du 21^e siècle et que 30% des besoins mondiaux de produits chimiques et de combustibles pourront être comblés par des ressources renouvelables au cours de la même période selon

² L'éthanol cellulosique est un biocarburant de transport fabriqué à partir de déchets agricoles et ligneux, ainsi que d'arbres à croissance rapide. La paille de blé, la canne à sucre, le maïs, les déchets ligneux, le panic érigé et le peuplier constituent autant de sources potentielles

l'OCDE. Bref, des opportunités s'ouvrent à nous pour développer les biocarburants de demain au Québec. La Figure 5 illustre en effet les tendances mondiales en énergie et carburants renouvelables. Le Québec se démarque d'ailleurs avec les éléments suivants :

- Les technologies de pointe sont relativement bien connues de nos centres de recherche,
- Nous avons l'espace, l'accès à l'eau et la connaissance pour déployer des infrastructures de taille industrielle;
- L'augmentation du coût des hydrocarbures fossiles rend les options d'énergie biosourcées compétitives. L'imposition de la taxe sur les carburants augmente d'autant plus la marge de rentabilité;
- L'immense disponibilité des biomasses forestière et agricole ainsi que le potentiel de production de la biomasse algale ouvrent une opportunité unique de synergie avec l'industrie forestière, l'agriculture et les pêches.

Global New Investment in Renewable Power and Fuels, Developed, Emerging and Developing Countries, 2005–2015

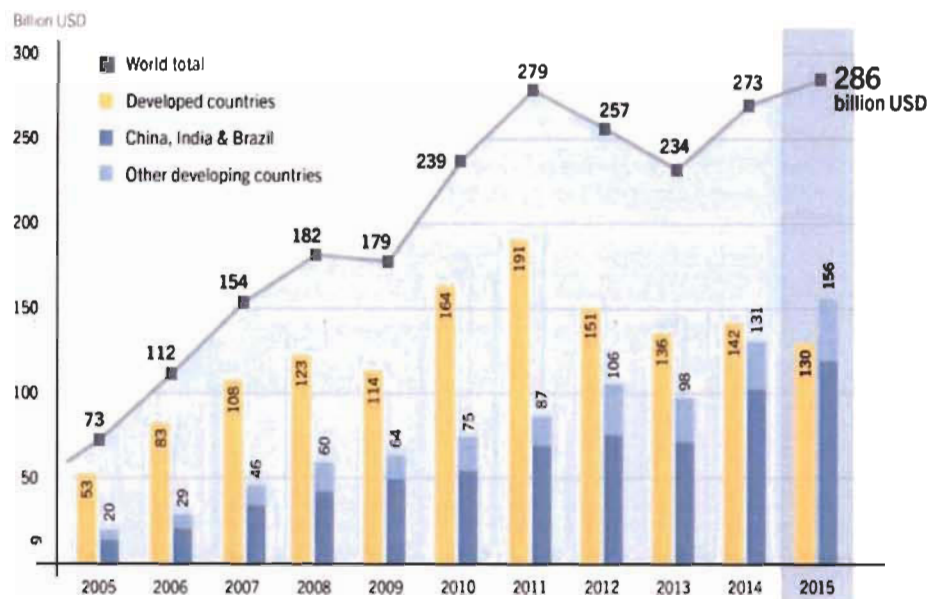


Figure 5 Investissements totaux dans les énergies renouvelables.

1.2 Contribution des biomasses dans le bilan énergétique

La consommation de carburants fossiles comme source d'énergie est d'une certaine façon carbone-neutre mais sur une période de quelques millions d'années. Nous devons rechercher dans l'utilisation des biomasses et autres énergies renouvelables un cycle de vie du carbone à l'intérieur d'une période raisonnable de moins de 50 ans. Il faut se rappeler que plus de 80% des réserves de pétrole proviennent de la biosynthèse du phytoplancton qui s'est passée, sous une atmosphère très riche en gaz carbonique émit lors du refroidissement de la croûte terrestre, entre 3 et 2,7 milliards d'années. Nous pouvons donc nous inspirer aujourd'hui de ce phénomène afin de développer une technologie qui reproduirait de façon économique ce mécanisme naturel qui a pris des millions d'années à se faire ; tout cela en tenant compte du cycle de vie du gaz carbonique. Nous nous sommes inspirés de projets à travers le monde (discuté dans les prochaines sous-sections) pour orienter notre recherche sur la densification de la récolte des microalgues avec le procédé d'électrocoagulation. À partir de ces microalgues, il est prévu d'extraire différents bioproduits qui ont

une valeur sur le marché de 500 à 1000 fois la valeur énergétique tirée des biocarburants. Voilà, entre autres, pourquoi nous avons choisi la biomasse algale :

- Sa capacité d'absorption du carbone par photosynthèse est plusieurs centaines de fois plus rapide que la biomasse forestière ou agricole (Figure 6).
- La production et le raffinage des algues n'entrent pas en conflit avec la production alimentaire et la sylviculture. Les systèmes de culture sont installés sur des terres arides et des milieux marins ou aquatiques.
- Outre les biocarburants produits, la valeur et la quantité des produits dérivés varient selon l'espèce de microalgues cultivées et des molécules produites. Il y a quatre groupes de molécules ; les protéines, les lipides, les pigments et carbohydrates, desquelles découlent une grande variété de produits pharmaceutiques, des cosmétiques, des huiles et des moulés pour l'agriculture et l'aquaculture.

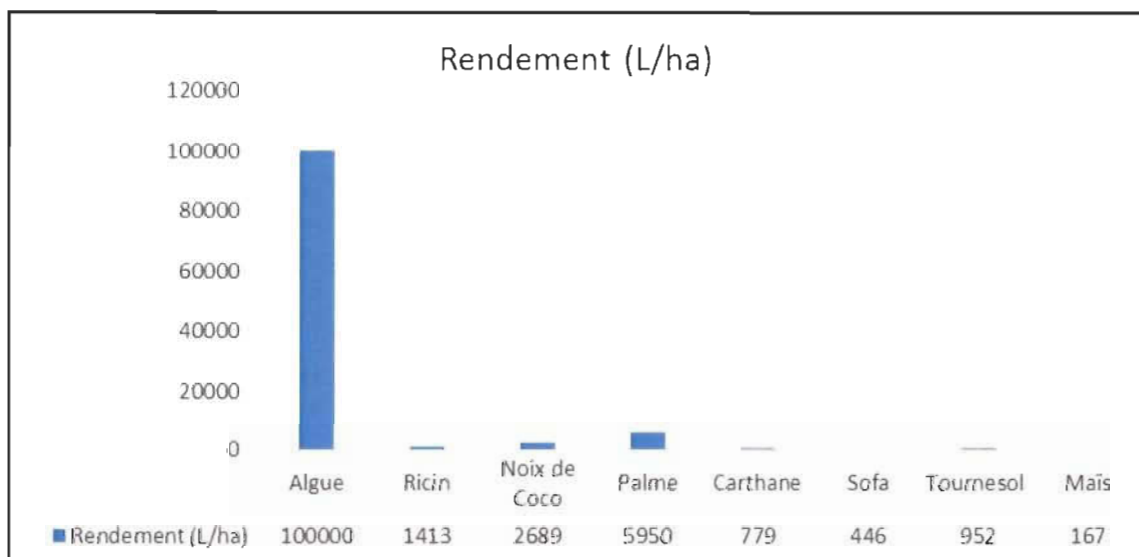


Figure 6 Rendement comparé des biomasses (source : www.rncan.gc.ca/forets/industrie/bioproducts).

1.3 Microalgues et algaïnage

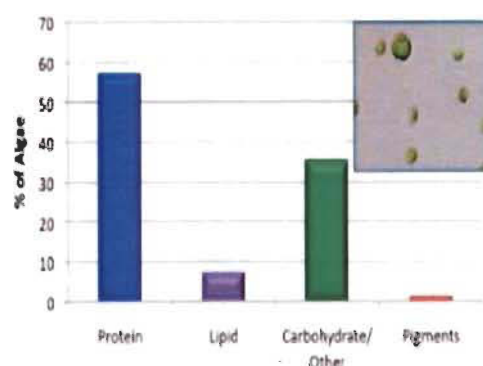
De l'extraction de la matière première jusqu'à fabrication de produits finis et la gestion de résidus, les étapes de raffinage de la biomasse algale sont semblables aux procédés utilisés pour le raffinage du pétrole et dans les usines de pétrochimie depuis 100 ans. La produc-

tion économique et viable de biocarburants et de produits dérivés doit passer par une évaluation des besoins en ressources terrestres. Il faut tenir compte des conditions climatiques de l'emplacement de la culture, de la disponibilité de l'eau salée ou douce, des ressources de traitement des eaux usées, des sources de CO₂ et les prix des terres.

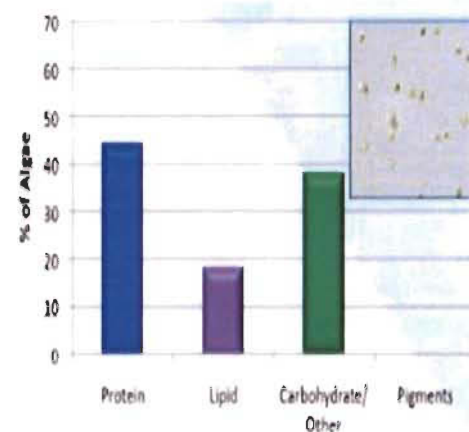
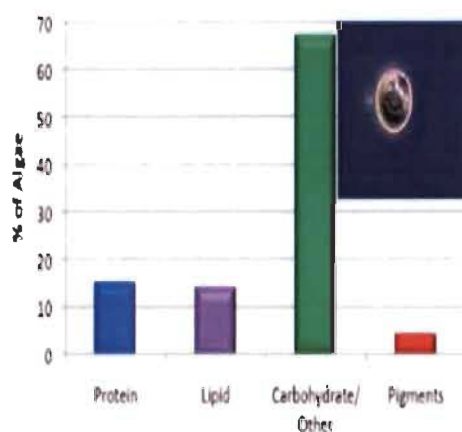
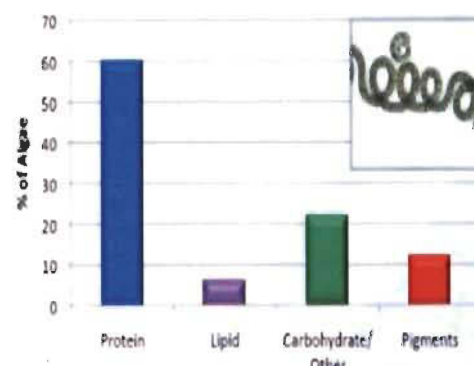
1.3.1 Souches de microalgues

Le choix des souches algales passe par l'analyse des caractéristiques de croissance et de la capacité à produire des biocarburants et des produits dérivés. Il y aurait dans la nature de 200 000 à quelques millions d'espèces de microalgues dont plus de 30 000 sont répertoriées et classifiées. Elles vivent dans l'eau douce ou salée et dans les milieux humides et croissent grâce au soleil, à l'eau et à une source de carbone organique ou de gaz carbonique. La spiruline donnera une meilleure récolte de protéines végétales et de pigments alors que *Chlorella* sp. produira plus de carbohydrates, moins de pigments et plus de 55% de la culture en protéines. Il existe des souches comme *Dunaliella* sp. qui produit près de 70% en carbohydrates. Pour la production de lipides, la souche *Nannochloropsis* sp. se démarque par la production de lipides dont le profil d'acides gras est adéquat pour l'obtention d'oméga 3 (Figure 7).

Chlorella



Spiruline



Dunaliella

Nannochloropsis

Figure 7 Composition des microalgues les plus utilisées à l'échelle industrielle (Sapphire Energy, 2015).

La spiruline et les espèces de chlorelles sont les principales espèces cultivées pour la production de protéines. D'autres espèces d'algues possèdent un niveau de protéines, lipides, vitamines, minéraux, antioxydants et de fibres qui répondent aux besoins des espèces aquacoles. Ainsi les algues seraient une alternative aux farines et graisses animales actuellement utilisées dans l'élevage des salmonidés. De plus, certaines espèces de microalgues produisent de l'astaxanthine, un pigment utilisé comme complément alimentaire pour la coloration rosée du saumon, de la truite et des crevettes.

1.4 Culture de microalgues

Les microalgues peuvent avoir un métabolisme autotrophe ou hétérotrophe. Un organisme autotrophe est un organisme qui génère par photosynthèse, en utilisant l'énergie lumineuse,

sa propre matière organique à partir d'éléments minéraux. Les matières inorganiques utilisées sont généralement le carbone sous forme de dioxyde de carbone, l'azote sous forme de NO_3^- ionique ou de N_2 et l'eau douce ou salée. Des nutriments complémentaires sont prélevés dans le milieu (ex. phosphate) pour produire la réaction suivante :



Le glucose $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ sert à former la matière organique et l'oxygène est rejeté dans l'environnement.

L'hétérotrophie est le métabolisme des microalgues qui se nourrir de matière organique préexistante comme source de carbone ainsi que comme source d'énergie et de l'oxygène de l'air comme oxydant. Cependant, elles peuvent également vivre en milieu sans oxygène dans un processus de fermentation. La source de carbone provient d'un cycle décomposition/biosynthèse de la biomasse vivante et morte des êtres vivants (végétaux, animaux, champignons et micro-organismes) où d'une partie de cette matière transformée (charbon, pétrole, gaz), minéralisée ou recyclée dans les écosystèmes et agroécosystèmes.

L'intérêt et la volonté politique pour les algocarburants ont été démontrés dans plusieurs pays par les instances gouvernementales et les entreprises privées. Par exemple, aux États-Unis, une aide substantielle fut accordée pour le développement de la biomasse algale et un partenariat stratégique entre Exxon Mobil et Synthetic Genomics Inc. (SGI) a investi \$600 millions dans un projet de R&D sur les biocarburants axés sur les algues. En mai 2013, SGI a annoncé un nouveau programme de recherche cofinancé par Exxon Mobil qui mettra l'accent sur l'utilisation de la science génomique synthétique pour améliorer la production de la biomasse. L'US DOE a annoncé en 2013 un investissement de \$13 millions pour accélérer le développement des biocarburants de prochaine génération dans le but de produire des biocarburants à moins de \$3 par gallon d'ici 2017 (http://apps1.eere.energy.gov/news/daily.cfm/hp_news_id=387). Une infime fraction, soit 161 tonnes de biocarburants renouvelables par jour, a été produite en 2011, sur une consommation mondiale quotidienne de 12 millions de tonnes de pétrole brut (Finley, 2013). Il y a de plus en plus d'intérêt dans le développement durable de systèmes de production de bio-

carburant algal pour relever les défis du changement climatique et la diminution des réserves de combustibles fossiles. Il y a de nombreux défis techniques à résoudre avant que la production de biocarburants algaux donne un «Net Energy Return (NER)» positif et qu'elle soit économiquement viable à l'échelle industrielle. Une quantité importante de ressources et de capitaux est investie en R&D, tant au niveau de la recherche fondamentale qu'au niveau de la recherche appliquée et industrielle (Leite et al., 2015; Williams et Laurens, 2010; Goldenberg, 2013). D'autres exemples de partenariats de R&D sont rapportés dans la littérature. Le consortium Algenol – Dow, BP – Martek, Shell – HR et Chevron – Solazyme développent des procédés de raffinage de biocarburants et de produits biosourcés. Un investissement de plus de \$300 millions est injecté dans la commercialisation des biocarburants algaux par un consortium d'organisations gouvernementales, commerciales et philanthropiques: Department of Energy (DOE), Chevron, BP, Carbon Trust ainsi que la fondation Rockefeller.

En 2010, The National Alliance for Advanced Biofuels and Bioproducts (NAABB), soit un regroupement de chercheurs des universités américaines et de partenaires privés, recevait du U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy (DOE- EERE), et de Bioenergy Technologies Office (BETO), le mandat de développer des méthodes de culture de biomasse algale économiquement viables pour produire des énergies renouvelables moins polluantes (Bigelow et al., 2011). Au cours de ces dernières années les technologies les plus prometteuses développées par le NAABB sont publiées et rendues disponibles, sans achat de licence, pour les industriels qui investissent dans des infrastructures de production. La culture commerciale des microalgues se retrouve sous différentes formes selon les conditions environnementales et économiques du milieu de culture, de la disponibilité des intrants et de la production souhaitée. Les systèmes de culture de microalgues les plus couramment utilisés sont des réacteurs en milieu ouvert ou fermé. Les installations les plus courantes se retrouvent à l'extérieur ou à l'intérieur dans des bassins, des tubes ou des poches translucides (Henley et al., 2013). Le choix de l'installation dépend des conditions du milieu de culture; les températures extérieures et le niveau d'ensoleillement, qui sont des facteurs déterminants. La culture à l'intérieur doit être alimentée en photons par de l'éclairage artificiel dans le spectre d'absorption des chlorophylles, soit d'une longueur d'onde de 400 à 700 nm; le plus souvent par des diodes électroluminescentes (DEL).

Les bassins « raceway avec agitation par roue à aubes » sont fréquemment utilisés pour la culture extérieure dans les zones d'ensoleillement favorables. La société Sapphire Energy établie à San Diego depuis 2007, a construit la première usine expérimentale au monde de production de pétrole vert à partir de la culture de microalgues. Mieux connue sous le nom de bioraffinerie intégrée d'algues ou IABR, l'usine de démonstration de Las Cruces Nouveau-Mexique NM fonctionne depuis 2008 sur un terrain de 22 acres. La construction d'une usine pilote de production commerciale a débuté en juin 2011 et fonctionne maintenant à Luna, près de Columbus. L'intégration de la chaîne de valeur du carburant à base d'algues de la culture à la récolte et à la conversion est un exemple de la convergence de la biotechnologie, de l'agriculture et l'énergie. L'usine employait en février 2014 plus de 150 employés pour une production de 100 barils par jour de pétrole vert. La production à échelle industrielle est prévue pour 2018 et devra pour être compétitive avec les pétrolières livrer un minimum de 5 000 barils par jour de « brut vert » ayant les propriétés du pétrole sédimentaire. La Figure 8 montre des images de leurs installations aux États-Unis.



Figure 8 Installations de Sapphire Energy (source : www.sapphireenergy.com).

Ce pétrole renouvelable offre en prime une réduction des émissions de carbone, par rapport aux émissions équivalentes au pétrole conventionnel, de plus de 70%. Sa production n'a pas d'impact sur les espaces de cultures agricoles, les terres arabes ou les espaces aquatiques productifs, étant donné que les algues nécessitent seulement la lumière du soleil, du CO₂ et de nutriments pour se développer dans l'eau salée ou douce recyclées. Le brut de Sapphire Energy peut être affiné dans une raffinerie typique et dosée de manière à satisfaire la demande croissante de nouvelles sources d'énergie renouvelables tout en réduisant la dépendance vis-à-vis du pétrole étranger. Les biocarburants sont utilisables, sans modification, dans les voitures, camions et avions d'aujourd'hui. L'essence produite à partir de ce brut vert atteint un indice d'octane de 91 tout en respectant les normes de qualité de carburant.

La ferme de culture occupe une centaine d'acres. Elle comprend des étangs de 1,1 acre à 2,2 hectares, ainsi que tous les équipements mécaniques nécessaires à la culture, la récolte des algues et le recyclage des eaux résiduelles pour une installation planifiée de 300 acres. Les travaux, débutés en juin 2011, ont été financés par des fonds privés et publics, y compris \$ 85 millions en investissements privés de Sapphire Energy, sous une garantie de prêt du département de l'Agriculture des États-Unis (USDA) et d'une subvention de \$ 50 millions accordée par le département de l'Énergie des États-Unis (DOE). À sa phase finale, l'installation d'environ 300 hectares d'étangs de culture d'algues et d'infrastructures de traitement produira 1,5 millions de gallons par an de pétrole brut à un coût compétitif au pétrole fossile. Les co-produits tel que des oméga-3, des huiles de grande valeur, de la nourriture pour l'aquaculture et l'alimentation animale contribueront à la rentabilité de l'entreprise.

Une version améliorée du procédé «raceway» a été développée par NAABB. Le système Aquaculture Raceway Integrated Design (ARID) assure une gestion améliorée de la température de l'eau dans la fourchette optimale, tout au long de l'année, selon la nature de la souche de microalgues.



Figure 9 Aquaculture Raceway Integrated Design (ARID) (source: AzCATI).

La culture en photobioréacteur extérieur ou intérieur (RBP) est un procédé plus coûteux mais très répandu pour la production de masse de microalgues en milieu contrôlé. Une meilleure maîtrise des paramètres de culture tels que la lumière, la température, le bullage de CO₂ et le mixage, donne un rendement avec le procédé RBP généralement 10 fois plus élevées que dans des étangs ouverts «raceway» (Luckner et al., 2014). La disposition des systèmes maximise les surfaces exposées tout en minimisant la quantité d'eau de culture. Le photobioréacteur de Bio Fuel Systems (BFS) en Espagne profite d'un ensoleillement et d'une température idéale pour la culture intensive des microorganismes en milieu fermé. Dans des tubes translucides verticaux de 8 mètres de hauteur, les surfaces d'implantation au sol et la productivité à l'hectare sont maximisées. Ce photobioréacteur offre une large surface de réception à l'énergie lumineuse afin d'assurer la fixation des photons et la production de biomasse en continu, avec un rapport surface/volume optimisé.



Figure 10 Photobioréacteur tubulaire extérieur de Biofuel Systems (source : www.biopetroleo.com/france/ubicacion).

Des variantes sur le même principe se multiplient à travers le monde mais le prototype développé par la NASA dans le projet Offshore Membrane Enclosures for Growing Algae (OMEGA) est un des plus prometteurs. Le photobioréacteur OMEGA se compose de gros tubes en plastique souples, flottant dans la mer et la culture est mélangée sous l'effet des vagues. Ces tubes contiennent des algues d'eau douce qui croissent dans les eaux usées.



Figure 11 Culture de microalgues en sacs (source : <https://sservi.nasa.gov/articles/omega>)

Ces microalgues sont les organismes les plus prolifiques de la nature pour la fixation du CO_2 . Les algues utilisent l'énergie du soleil, le dioxyde de carbone et des nutriments des

eaux usées municipales et/ou industrielles pour produire de la biomasse. Les algues nettoient les eaux usées en prélevant les éléments nutritifs qui autrement contamineraient, au point de rejet, la faune et la flore marines.

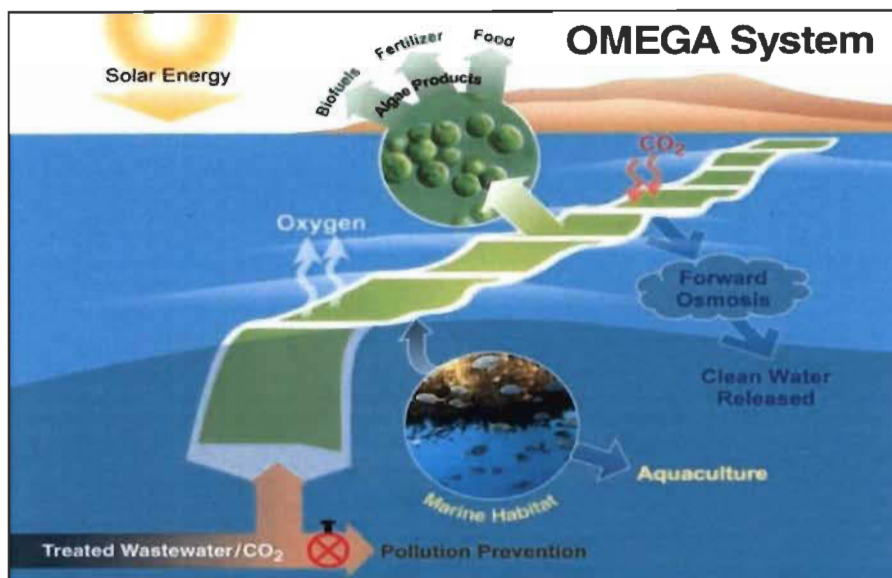


Figure 12 Procédé de culture OMEGA (source : <https://www.nasa.gov/centers/ames/research/OMEGA/index.html>).

L'étude de faisabilité technique du système OMEGA de la NASA a démontré que c'est un moyen efficace de cultiver des microalgues ainsi qu'une façon économique de traiter des eaux usées à petite échelle. De surcroît, c'est un bon moyen de produire des biocarburants, de réduire l'émission de GES et de diminuer l'acidification des océans en réduisant par osmose le CO₂ dissous.

En général, le rendement en biomasse par mètre cube de culture dans un système fermé de type photobioréacteur est de 10 à 15 fois supérieur qu'avec un procédé «raceway». Une étude comparative de la production de lipides en photobioréacteur (6 unités de 132 tubes de 80m de long et 6cm de diamètre) et en «raceway» (8 étangs de 978 m², 12 m de large, 82 m long et 30cm de profondeur) a donné les résultats exprimés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 Rendement des méthodes de culture (Cadoret et Bernard, 2008).

| | Photobioéacteur | «Raceway» |
|---|-----------------|-----------|
| Production annuelle (kg) | 100 000 | 100 000 |
| Concentration de biomasse (g.L. ⁻¹) | 4,0 | 0,140 |
| Surface de production (m ²) | 5681 | 7828 |
| Rendement de volume (kg. jour ⁻¹ .m ⁻³) | 1,535 | 0,117 |
| Rendement de surface (kg. jour ⁻¹ .m ⁻²) | 0,048 | 0,035 |
| Récolte de biomasse sèche (kg.m ²) | 18 | 13 |
| Absorption annuelle de CO ₂ (kg) | 165000 | 165000 |
| Concentration de la biomasse en carbone | 61% | 61% |

1.4.1 Photosynthèse et CO₂

Que ce soit en autotrophie ou hétérotrophie, l'énergie lumineuse est nécessaire à la photosynthèse. La source la plus abondante et gratuite est le rayonnement solaire. Par contre les surfaces exposées doivent être énormes, compte tenu de l'efficacité du processus. (Hughes, 2011). En laboratoire, dans des conditions contrôlées, il faut 10 moles de photons pour fixer une mole de CO₂. Si l'on considère qu'en moyenne, une mole de carbone dans la cellule correspond à une énergie de 475 kJ, et qu'une mole de photon a une énergie moyenne de 217 kJ, le rendement moyen théorique de la photosynthèse est de 22%. Seulement 45 % du spectre solaire est exploitable par les photosystèmes (principalement dans spectre du rouge au bleu de longueur d'onde de 400nm à 700nm). Le rendement maximal de la photosynthèse par rapport à lumière solaire est donc au mieux de 9.9% (Creek, 2011).

Dans la nature, la photosynthèse régularise la concentration du CO₂ dans l'atmosphère, qui est responsable de l'équilibre précaire de la température et de la qualité de l'atmosphère. Le phytoplancton marin est responsable de plus de la moitié de la fixation totale du CO₂ sur notre planète, et les cyanobactéries, qui comptent parmi les formes vivantes les plus anciennes, furent même à l'origine d'un phénomène connu sous le nom de «grande oxydation», il y a environ 2,4 milliards d'années : une crise climatique inverse de celle qui nous menace aujourd'hui, avec un déséquilibre de l'atmosphère au profit de l'oxygène.

1.4.2 Cycle du CO₂ et réduction des gaz à effet de serre

Dans un milieu aqueux le CO₂ dissous est par photosynthèse absorbé par les microalgues. Cette biomasse algale peut être récoltée et séchée à coût raisonnable à un taux d'humidité

de 80 à 95 % et transformée directement après la récolte en biocarburants composés d'éthanol, méthane, hydrogène et des hydrocarbures.

Tableau 2 Cycle du CO₂ dans une culture de *Chlorella vulgaris* (Lam et Lee, 2013)

| Concentration CO ₂ dans le gaz (%) | Taux de consommation du CO ₂ (mgL ⁻¹ .j ⁻¹) | Efficacité d'élimination du CO ₂ (%) | Taux de croissance (j ⁻¹) | Biomasse produite (mgL ⁻¹ .j ⁻¹) | Production de lipides (%) |
|---|--|--|---|---|---------------------------------|
| 0.03 | 63.1 | 92.2 | 0.156 | 31.54 | 18.1 |
| 0.5 | 76.3 | 7.1 | 0.160 | 34.06 | 18.5 |
| 1 | 96.6 | 4.5 | 0.190 | 43.14 | 18.4 |
| 2 | 106.7 | 2.5 | 0.196 | 47.36 | 18.4 |
| 5 | 162.7 | 1.5 | 0.283 | 72.66 | 18.7 |

Dans un bassin contenant les nutriments appropriés et d'une source lumineuse naturelle et/ou d'appoint, en maintenant 5% de CO₂ dissous une culture de *Chlorella vulgaris* pourrait absorber 2.25 tonnes de CO₂ pour produire 1 tonne de biomasse. Cette biomasse peut, par la suite, être transformée en biodiesel. Les procédés d'hydrocraquage et de HTL donnent une conversion de plus de 30% en diesel vert. Dans un bassin contenant les nutriments appropriés et d'une source lumineuse naturelle et/ou d'appoint, en maintenant 5% de CO₂ dissous une culture de *Chlorella vulgaris* pourrait absorber 2.25 tonnes de CO₂ pour produire 1 tonne de biomasse. Cette biomasse peut par la suite être transformée en biodiesel. Les procédés d'hydrocraquage et de HTL donnent une conversion de plus de 30% en diesel vert essentiellement sous forme de C₁₂H₂₄ de poids moléculaire de 168g/mol. Les 300 kg de carburant ainsi obtenu émettront dans l'environnement 945 kg de CO₂ de poids moléculaire de 44g/mol. À des fins d'analyse sommaire de faisabilité, on peut simplifier en concluant que pour 2 tonnes de dioxyde de carbone absorbés une tonne de CO₂ est émise à l'atmosphère.

1.4.3 Nutriments

Une partie importante des coûts pour la production de la biomasse algale est attribuable à l'utilisation de l'eau et à l'ajout de nutriments. Dans un récent rapport (Développement durable des biocarburants aux États-Unis, 2012), le National Research Council of the National Academies a conclu que pour atteindre un objectif raisonnable et soutenable de produire 5% de la consommation annuelle américaine de carburant pour le transport des biens et des personnes, il faudrait produire annuellement quelque 40 milliards de litres de biocarburant algale. Les quantités d'eau de culture et les nutriments nécessaires pour cette modeste production seraient d'au moins 123 milliards de litres d'eau, 6 millions de tonnes d'azote et de 1 million de tonnes de phosphore. Sans recyclage, pour générer suffisamment d'eaux usées et de nutriments, il faudrait respectivement 1 fois, 4 fois et 5 fois les rejets de l'ensemble de la population américaine. Il s'agit d'un objectif tout à fait irréalisable sans le recyclage de l'eau et des nutriments nécessaires à la culture. Les eaux usées municipales sont parmi les plus prometteuses pour la fourniture de l'eau et des nutriments (azote, phosphore et oligo-éléments) requis pour la croissance des algues. (Kropat et al., 2011). L'utilisation des eaux usées pour la culture algale fait l'objet de nombreuses études, pour développer des alternatives à l'utilisation déraisonnable d'eau douce, surtout dans les régions de climats arides, et à l'achat dispendieux de nutriments. De plus l'industrie du traitement des eaux s'intéresse à des technologies complémentaires qui permettraient de réduire la teneur en azote et en phosphore dans les rejets d'eaux usées.

Dans le cadre de la recherche sur les biocarburants de NAABB, trois études adressent cette problématique. La première étude est d'évaluer l'effet sur les algues de la toxicité des métaux et des autres contaminants contenus dans les eaux usées. Les deux autres études sont sur l'évaluation des différents types d'eaux usées provenant des usines d'épuration de l'Arizona et sur des eaux usées municipales et industrielles d'autres régions semi-arides du Sud-Ouest américain. Ces recherches ont démontré, que pour produire à l'échelle commerciale 4-6 kg de biodiésel il faut utiliser 3700 kg d'eau, 0,3 kg d'azote, et 0,7 kg phosphate alors que la grande quantité d'eau requise pour le procédé d'extraction à l'eau chaude d'un baril de pétrole des sables bitumineux est de 2 à 5 barils d'eau douce contaminée qui se retrouve dans d'immenses bassins de stockage.

Encore une fois les conclusions sont les mêmes : sans l'utilisation et le recyclage des eaux usées municipales et la récupération des nutriments, on ne peut satisfaire aux besoins nutritionnels des microalgues pour la production de biocarburants à grande échelle. Pour faire des biocarburants une source d'énergie durable, il faut limiter la prise d'eau dans les grands cours d'eau, car cela entraînerait un assèchement des sols et une baisse de la nappe phréatique, et récupérer les nutriments nécessaires à la culture.

1.5 Récolte de la biomasse algale

Une fois la souche d'algues et le système de culture appropriés sont sélectionnés, un procédé de récolte doit aussi être mis en place pour récolter, concentrer et assécher partiellement la biomasse algale. À partir de concentrations d'algues (poids sec/poids humide) très diluées, généralement autour de 0,05 % pour la croissance autotrophe jusqu'à 0,2 % pour la croissance hétérotrophe, la déshydratation est nécessaire avant tout traitement de la biomasse (Wu et Shi, 2007; Gouveia et Oliveira, 2008; Molina Grima et coll., 2003; Mata et al., 2010; Zhu et Ketola, 2012). Puisque la récolte de la biomasse algale implique la gestion d'une grande quantité d'eau, en plus du recyclage des eaux résiduelles et des nutriments, cette étape représente des coûts importants dans le processus de production de biocarburants.

L'efficacité de la récolte est l'un des principaux facteurs dans le développement des biocarburants en raison de la forte consommation d'énergie nécessaire avec les méthodes actuelles de concentration. En effet, cette étape peut représenter 20 à 30 % du coût total de production (Uduman et al., 2010).

La récolte des microalgues est habituellement un processus en deux étapes ; la première étape est une concentration à l'aide des techniques communes, telles que la sédimentation, la flottation, la filtration et la centrifugation. Ces méthodes concentrent la biomasse algale à une teneur en matière sèche de 2 à 7 % (Gouveia, 2011). De résultats supérieurs, de 15 à 20%, sont obtenus avec des procédés électrolytiques, d'osmose inversée et de floculation chimique et ionique.

Dépendamment du produit recherché, la biomasse récoltée après une première étape peut être encore trop humide pour réaliser un traitement en aval. Une deuxième étape est alors nécessaire pour poursuivre la conversion des algues ou l'extraction de molécules des cellules. Une déshydratation par le biais de procédés thermiques, physiques et chimiques doit alors être réalisée. Selon les besoins, la biomasse doit atteindre une teneur en solides de 70% jusqu'à 95 à 99 % (Brennan et al., 2010).

La valorisation des biomasses est un défi technique et économique important. Des investissements colossaux sont mis dans la recherche pour rendre le coût des énergies biosourcées et renouvelables plus compétitif par rapport aux carburants fossiles.

Par conséquent, une équipe de recherche de la NAABB travaille sur le développement de technologies de récolte et d'extraction des lipides à faible coût en énergie et en produits chimiques de séparation.

La NAABB oriente le développement des nouvelles techniques de récolte et d'extraction pour limiter les coûts de pompage et de déplacement de la culture sur de longues distances. L'impact des activités sur l'environnement est aussi un facteur déterminant sur le choix du procédé ; l'utilisation de solvants chimiques doit être limitée pour permettre le recyclage de l'eau et des nutriments après un traitement sommaire. Le rejet des eaux résiduelles, les émissions de gaz, les solides et les boues biologiques doivent être compatibles avec le milieu récepteur. Les chercheurs de la NAABB ont évalué, à l'échelle laboratoire, la performance ainsi que les coûts énergétiques de cinq procédés de récolte et de quatre méthodes d'extraction.

Les données sur l'analyse technico-économique des neuf technologies novatrices développées par NAABB par rapport aux technologies de base apparaissent dans le Tableau 3. Les résultats sont comparés sur la base de la consommation d'énergie, des coûts de produits chimiques, de l'électricité, des autres frais d'exploitation et les pertes d'énergie parasite (PEL).

Tableau 3 Comparaison des coûts des technologies de récolte et d'extraction (NAABB, 2013).

| Technology | Energy Input (kWh/kg) | Chemical Cost (\$us/kg) | Electricity Cost (\$us/kg) | OPEX (\$us/kg) | OPEX (\$us/Gal) | PEL |
|---|-----------------------|-------------------------|----------------------------|----------------|-----------------|-------|
| Baseline Harvesting Technologies | | | | | | |
| Centrifuge Baseline | 3.300 | 0.000 | 0.264 | 0.264 | 1.799 | 56.98 |
| Dissolved Air Floatation | 0.250 | 0.008 | 0.020 | 0.028 | 0.191 | 4.317 |
| Spiral Plate Separation | 1.418 | 0.000 | 0.113 | 0.113 | 0.773 | 24.47 |
| NAABB Harvesting Technologies | | | | | | |
| Chitosan Flocculation | 0.005 | 0.055 | 0.000 | 0.055 | 0.377 | 0.093 |
| AlCl ₃ Flocculation | 0.120 | 0.046 | 0.010 | 0.056 | 0.380 | 2.072 |
| Electrolytic Harvesting | 0.039 | 0.004 | 0.003 | 0.007 | 0.049 | 0.673 |
| Membrane Filtration | 0.046 | 0.000 | 0.004 | 0.004 | 0.025 | 0.789 |
| Ultrasonic Harvesting | 0.078 | 0.000 | 0.006 | 0.006 | 0.043 | 1.347 |
| Baseline Extraction Technologies | | | | | | |
| Pulsed Electric Field | 11.52 | 0.000 | 0.922 | 0.922 | 6.280 | 198.9 |
| Wet Hexane Extraction | 0.110 | 0.001 | 0.009 | 0.010 | 0.068 | 1.904 |
| NAABB Extraction Technologies | | | | | | |
| Solvent Phase Algal Migra- | 1.648 | 0.947 | 0.132 | 1.079 | 7.352 | 28.45 |
| Ultrasonic Extraction | 0.384 | 0.000 | 0.031 | 0.031 | 0.209 | 6.630 |
| Nanoparticle Mesoporous | 0.008 | 54.35 | 0.001 | 54.36 | 370.5 | 0.137 |
| Supercritical | 1.174 | 0.000 | 0.094 | 0.094 | 0.640 | 20.27 |

Il apparait clairement que parmi les procédés de récolte développés par le NAABB, trois d'entre eux donnent une performance très supérieure aux technologies de base. Par rapport au procédé de séparation par centrifugeuse, le coût de la récolte de 1kg passe de 26.4¢ à 0.7¢ avec la collecte par électrocoagulation (E.C.).

1.5.1 Technologies de base

La centrifugation est une méthode fiable et efficace pour les concentrations relativement faibles de biomasse provenant de systèmes de culture de microalgues avec juste une légère différence de densité entre la phase liquide et la petite taille des cellules de microalgues. Cette méthode est essentiellement capable de concentrer la plupart des particules car elle est relativement peu influencée par la grosseur des microalgues et leur structure. Une centrifugeuse peut récolter un étang de culture d'algues de 115 m² et 0,3 m de profondeur en une heure. Toutefois, cela est très énergivore (8 kWh m⁻³) et donne un ratio NER en dessous de l'unité, en considérant la récolte d'une culture d'algues d'une concentration de 0,02

% (poids sec/poids humide), avec une teneur moyenne en lipides de 30 % (poids/poids sec d'algues) jusqu'à former une pâte d'algues de 20% (poids sec/poids humide) en une heure. La récolte d'environ 35 000 litres donnerait 7 kg de biomasse algale contenant 2,1 kg de lipides (Dassey et Theegala, 2013).

La flottation à air dissous (DAF) est un procédé de séparation par gravité dans lequel des bulles d'air ou de gaz sont introduites dans le fond d'un mélange solide-liquide. Les bulles se fixent sur les particules solides et les entraînent à la surface. L'auto-flottation des algues par l'oxygène produite naturellement par la photosynthèse s'est avérée être un processus rapide et efficace pour la récolte des algues du bassin à haut débit. (Koopman et Lincoln, 2011). L'ajout d'électrolytes tels que les sels d'aluminium et de fer ou de polymères organiques ionisés, améliore substantiellement le rendement en diminuant la répulsion naturelle entre les bulles d'air et les algues chargées négativement. Les fines bulles de 10 à 100 µm produites par la décompression d'un liquide sous pression, capturent des particules de diamètre < 500 µm et entraînent les floes en surface. Ce processus est efficace sur de grands volumes et fonctionne bien en eau douce (Crossley et al., 2001).

1.5.2 Technologies novatrices

L'utilisation des ultrasons avec du chitosane comme coagulant est une des technologies novatrices (Figure 13). La biomasse algale est soumise à des ultrasons ce qui facilite la sédimentation des microalgues. Il a été rapporté lors d'une conférence à Séoul que l'application d'ultrason de 108 kHz durant 30 secondes sur une aquaculture de phytoplanctons a produit les meilleures récoltes (SICLSBE, 2015). De plus, l'ajout d'un flocculant tel que le chitosane augmente la sédimentation. Le chitosane est un coagulant biodégradable et biocompatible produit à partir de déchets provenant de la carapace de crustacés et de la transformation industrielle des champignons. Le chitosane a des affinités chimiques avec les lipides, il peut se lier avec environ 15 fois son propre poids de lipides.

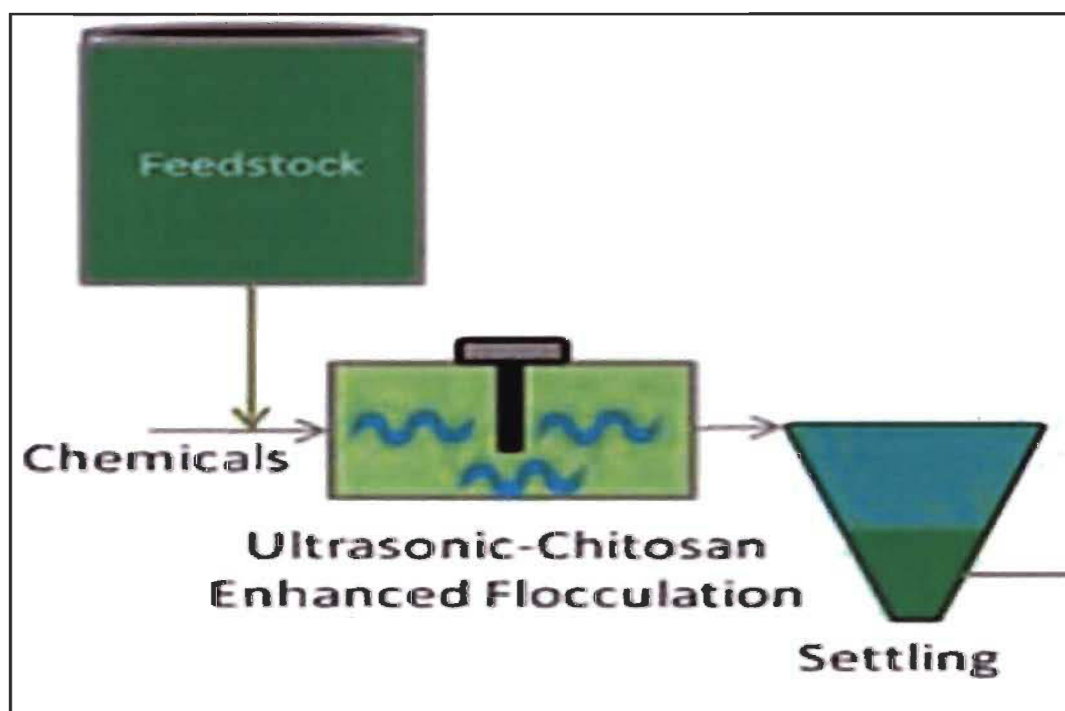


Figure 13 Procédé à pulsion ultrasonique et chitosane.

La récolte par filtration sur membrane poreuse est une autre technologie innovante (Figure 14). Une mince feuille d'un alliage de nickel intercepte tangentiellement le flux de la solution de microalgues. Les tests ont été conduits sur une culture de *N. salina* et de *Chlorella* sp. *DOE1412*, avec une unité mobile au Texas AgriLife Research Station, Pecos, Texas (NAABB, 2010).

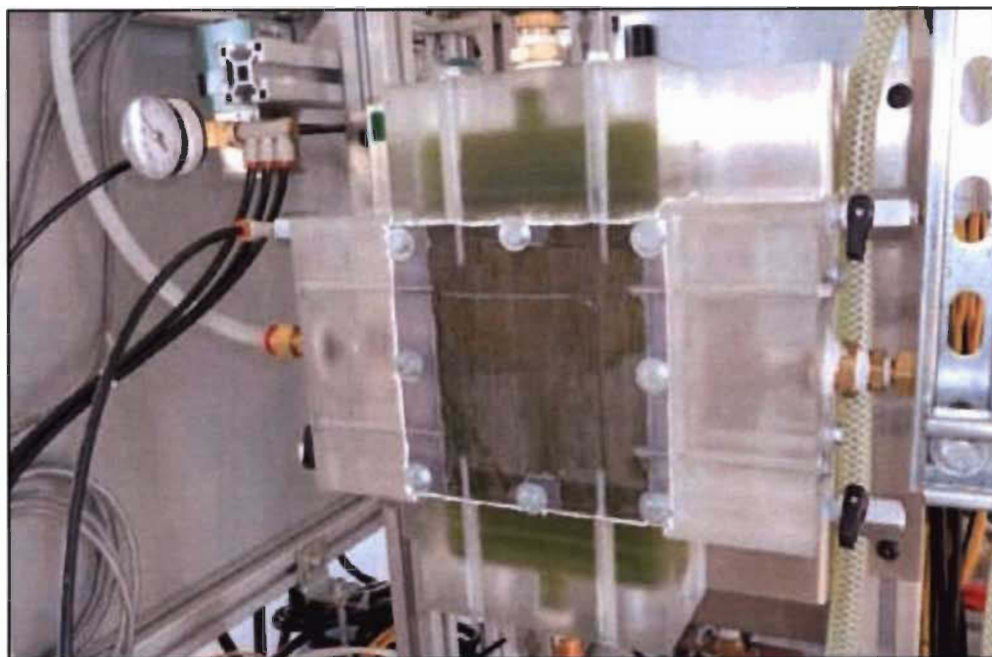


Figure 14 Cross-flow membrane modules assembled for field tests; 1,26m² of membrane area, 1mm feed flow channel opening.

Enfin, le procédé d'électrocoagulation (EC) est certainement une technologie innovante très prometteuse (Figure 15). Le procédé d'électrocoagulation est un procédé électrolytique qui consiste à générer, *in situ*, un agent coagulant en appliquant un courant électrique continu à travers une anode sacrificielle composée d'éléments métalliques. Les cations métalliques mis en solution dans les eaux à traiter se complexifient pour former des ions hydroxydes, et ce sont ces composés qui jouent le rôle de coagulant. La dissolution des ions libérés de l'anode réactive se traduit par la formation coagulante qui déstabilise la suspension des microalgues en se combinant avec les ions métalliques chargés positivement. La contamination avec des hydroxydes métalliques est considérablement abaissée par rapport aux coagulants chimiques des autres méthodes.

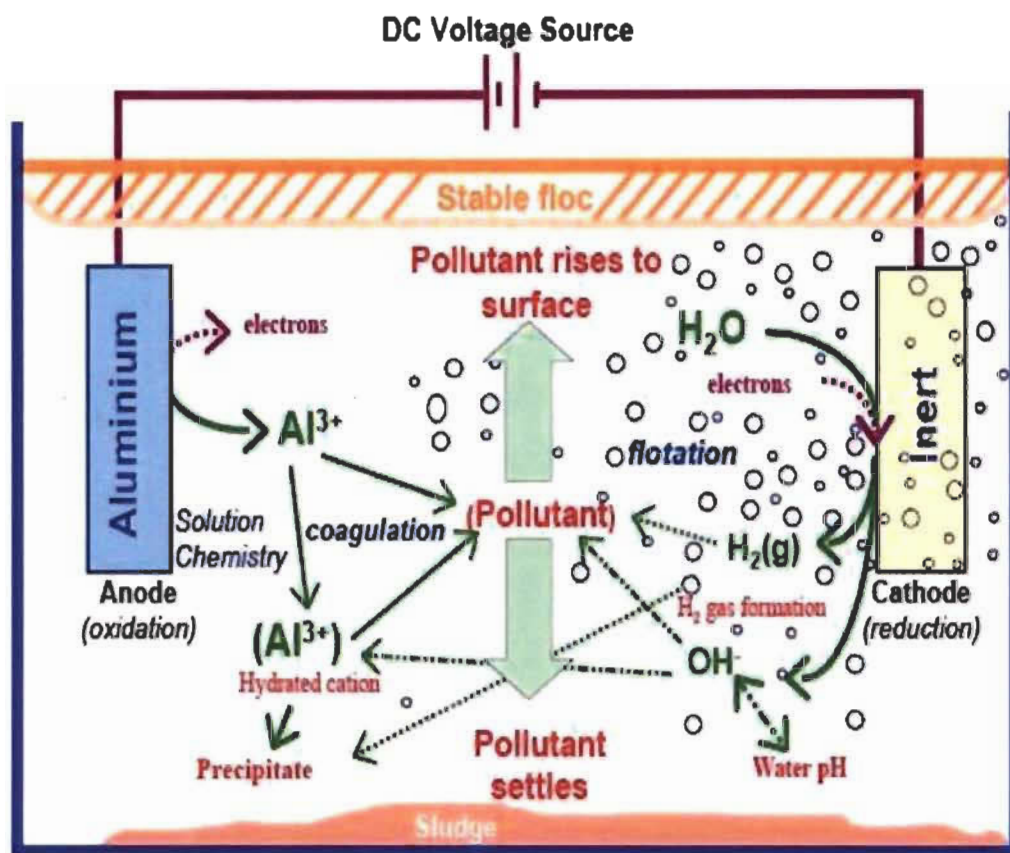


Figure 15 Cellule typique avec anode d'aluminium.

L'aluminium et le fer sont les métaux les plus couramment utilisés dans ce type de procédé. Les électrodes ferriques sont moins utilisés car ils consomment plus d'énergie et donnent moins de rendement. En contrôlant l'intensité du courant continu appliqué à l'anode, le dosage de coagulant peut être ajusté afin de satisfaire les objectifs de traitement tout en réduisant la consommation de métaux de l'électrode. Le procédé d'électrocoagulation-flotation est bien connu et fréquemment utilisé pour le traitement des eaux usées. De plus, cette méthode s'adapte très bien pour la récolte des microalgues cultivées dans un substrat d'eaux usées riches en matières organiques. L'équipe du NAABB a effectué plusieurs essais terrain du procédé électrocoagulation (EC) en utilisant une unité commerciale d'électrocoagulation du fabricant Kaselco traditionnellement utilisée pour le traitement des eaux usées (Figure 16).

Les essais de démonstration ont été effectués à la station de recherche de la AgriLife Texas, en utilisant des cultures actives de *N. salina* et de *Chorella* sp. Les tests ont donné un facteur de concentration de 50 fois et un taux de récupération de 95 % à l'aide de seulement 25 % de l'énergie utilisée avec la technologie de centrifugeuse de base.



Figure 16 Réacteur Kasselco dans les installations du NAABB's à Pecos, Texas.

Le groupe de recherche a publié les résultats de l'étude de 7 scénarios, comportant différentes combinaisons de technologies de productions, de récolte et conversion de la biomasse algale. Une copie intégrale du sommaire des résultats obtenus sur sept installations au Texas et en Arizona est reproduite au Tableau 4. Des conclusions intéressantes se dégagent de l'analyse de faisabilité économique des sept scénarios étudiés par l'équipe du NAABB pour la production de biocarburant algal à l'échelle commerciale. De plus, le scénario # 7 est une évaluation comparée des performances sur une souche d'OGM développée en laboratoire montrant un gain de productivité substantiel.

Tableau 4 Sommaire de l'étude du NAABB, à l'échelle pré-commerciale, des sept meilleures alternatives de récolte (NAABB, 2013)

| Summary of the technologies analyzed for the seven alternative scenarios. | | | | | | | |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | Scenario 1 | Scenario 2 | Scenario 3 | Scenario 4 | Scenario 5 | Scenario 6 | Scenario 7 |
| Products | Crude TAG & LEA | Crude TAG & LEA | Crude TAG & LEA | Crude HTL oil & CH ₄ | Crude HTL oil & CH ₄ | Crude HTL oil & CH ₄ | Crude HTL oil & CH ₄ |
| Cultivation | Open pond w/liners | Open pond w/liners | ARID w/liners | Open pond w/liners | Open pond w/liners | ARID w/liners | ARID w/liners |
| Feedstock Strain g/m²/d | Generic 7.4 | Generic 7.4 | Generic 9.3 | Generic 7.4 | Generic 19.4 | Generic 9.3 | GMO 23.2 |
| Harvesting | Centrifuge | EC | EC | Centrifuge | EC | EC | EC |
| Extraction | Wet solvent extraction | Wet solvent extraction | Wet solvent extraction | HTL-CHG | HTL-CHG | HTL-CHG | HTL-CHG |
| Nutrient Recycling | No | No | No | Yes | Yes | Yes | Yes |
| Biomass Production (tons/yr) | 119,900 | 119,900 | 152,200 | 119,900 | 316,800 | 152,200 | 378,600 |
| Crude Oil Production (gallons/yr) | 4,679,000 | 5,096,000 | 6,470,000 | 13,510,000 | 42,320,000 | 20,330,000 | 51,570,000 |
| Location | Pecos, TX | Pecos, TX | Tucson, AZ | Pecos, TX | Pecos, TX | Tucson, AZ | Tucson, AZ |

De l'étude, il se dégage les conclusions suivantes :

- Comparativement à la centrifugeuse, la récolte par E.C. est 9% supérieure en combinaison à une extraction humide aux solvants et 313% en combinaison avec un conversion par HTL-CHG.
- La culture des algues dans un système ARID donne un rendement supérieur de 27% par rapport à la culture dans un «raceway».
- Le traitement HTL-CHG par rapport à l'extraction par solvant humide réduit la consommation d'énergie de 98 % (Tableau 2.4.a : de 3.3 à 0.039 kWh/kg).
- La meilleure performance a été obtenue avec une souche OGM, soit un gain de 250% par rapport à une souche indigène.

1.5.3 Origin Clear Inc.

Une technologie intéressante a été développée à la demande des compagnies pétrolières pour traiter les eaux usées contaminées par des boues huileuses et des matières en suspension des champs agricoles de la région de Bakersfield en Californie (Wiles et al, 2015). Cette technologie est une combinaison de techniques d'électrolyse et d'ultrafiltration (Figure 17).



Figure 17 Usine pilote de OriginClear à Bakersfield.

L'unité d'électrolyse Electro EWS[®] utilisée dans cet exemple est un système fourni par OriginClear. Le système se compose de trois étapes électrochimiques : l'électrocoagulation, l'électroflottation et l'électro-oxydation. Ce système élimine jusqu'à 95 % des contaminants non-solubles et fournit même une désinfection primaire. Un deuxième traitement sur membrane ultra filtrante vient supprimer le reste des particules en suspension. Cette chaîne de traitement arrive à réduire de 99.8% une turbidité de départ de NTU 842. La combinaison des trois étapes d'électrotechniques suivie par la phase de filtration pourrait s'appliquer avantageusement à la récolte des microalgues.

1.6 Traitement et conversion de la biomasse

Plusieurs modes de traitement sont utilisés pour la transformation de la biomasse algale en biopétrole et autres produits dérivés. Par contre, notre intérêt se limitera dans cette étude au procédé de traitement thermochimique de liquéfaction hydrothermale et la gazéification hydrothermale catalytique (HTL-CHG; Figure 18), bien connu par l'industrie du raffinage de pétrole (NAABB, 2012).

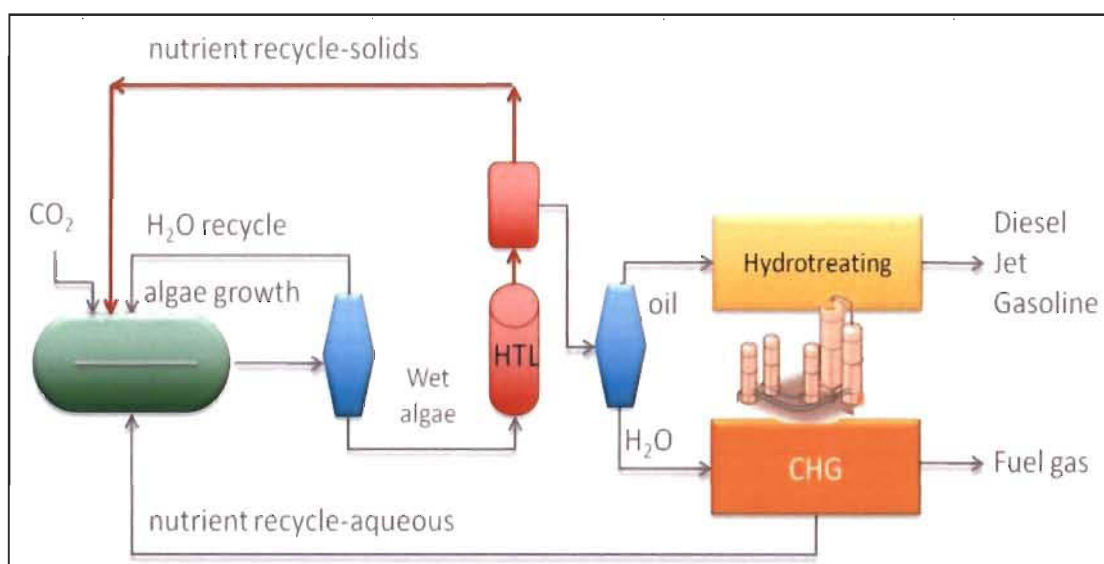


Figure 18 Schéma d'un procédé HTL-CHG.

La liquéfaction hydrothermale de la biomasse est la conversion thermochimique de la biomasse en carburants liquides dans un réacteur sous haute pression et à une température suffisante pour, briser la structure solide de bio polymères. Les conditions typiques de traitement sont de l'ordre de 523– 647 degrés Kelvin en température et sous une pression de 4 à 22 MPa.

Le réacteur HTL est alimenté directement de biomasse d'algues humides (15 -20 % poids sec/poids humide). En plus d'un résidu solide, une bio-huile et un effluent d'eau en ressortent en deux phases séparées sans nécessiter d'extraction par solvant. Le flux de bio-huile est facilement transformé par hydrotraitement en pétrole qui par la suite peut être fractionné en «jet fuel», diesel et autres fractions de naphte. L'effluent aqueux peut ensuite être gazéifié

par gazéification hydrothermale catalytique (CHG), ce qui permet de produire du carburant supplémentaire sous la forme d'un mélange de dioxyde de carbone/gaz de méthane et récupérer les nutriments résiduels (azote, phosphore et autres oligo-éléments) pour une réutilisation dans la culture. Le procédé HTL-CHG permet de convertir 85 % du carbone contenu dans les algues en hydrocarbures conformes aux normes des carburants Jet A et diesel (DOE, 2010).

1.7 Procédé RT Algae

Tel que mentionné précédemment, l'UQTR a entrepris des projets de recherche couvrant toute la chaîne de production des microalgues, en cohabitation avec des usines, du développement de la souche au produit final. Ces recherches sont réalisées avec de nombreux collaborateurs dont le centre collégial de transfert technologique Innofibre du Cégep de Trois-Rivières (Québec, Canada) et ont mené au développement du procédé RT Algae. En effet, dans l'atelier pilote d'Innofibre du Cégep de Trois-Rivières (Québec, Canada), les équipes du professeur Simon Barnabé et d'Innofibre ont utilisé des équipements servant à l'industrie des pâtes et papiers, pour récolter et concentrer les microalgues en retirant l'eau. Une pâte de microalgues a été produite et convertie en biobrut avec un traitement de liquéfaction hydrothermale (Boëns et al., 2015). La première section d'une machine à papier, le Foudrinier, a été utilisée pour déshydrater la biomasse algale préalablement concentrée par sédimentation. La biomasse est déposée sur le Foudrinier suite à la formation d'une mince couche de fibre, équivalent à 5% du poids sec d'algues. Il en ressort un matelas sec et consistant (Figure 18). Ce procédé est fort intéressant, économique et efficace compte tenu de la grande disponibilité de machines à papier de taille industrielle, due à la réduction de la demande pour les papiers traditionnels. Cette expérience démontre clairement la faisabilité technique de produire sur une base industrielle de grande quantité de microalgues. D'autant plus intéressant est la synergie créée avec l'industrie des pâtes et papiers qui pourrait ainsi rentabiliser ses usines.



Figure 18 Foudrinier d'une machine à papier et microalgues déshydratées après un passage.

Néanmoins, malgré l'efficacité du procédé RT Algae, la chaîne de production des microalgues en cohabitation n'est toujours pas rentable. Parmi les options qui se présentent pour rentabiliser la chaîne, l'utilisation d'une technologie d'électrocoagulation en complémentarité ou non avec le procédé RT Algae est proposée. La technologie sélectionnée est celle de l'entreprise québécoise E2 Metrix. Il s'agit de la technologie Ecothor^{MD} qui est une méthode de séparation par électrocoagulation ayant la particularité de générer un coagulant par passage du courant électrique (US/61, 706, 917). Cela permettrait de récupérer la biomasse algale avec aussi peu que 0,5 kWh/m³. Cette technologie de séparation se présente comme une technologie adéquate pour ce genre d'application. Ses principaux avantages sont les suivants : 1) pas d'usage de produits chimiques; 2) combinaison de la récolte et de la concentration primaire ou pré-épaississement; 3) coût énergétique très faible; 4) agrégat et produit non contaminé. E2metrix a fait appel à plusieurs groupes au Québec œuvrant dans le secteur de la production de microalgues pour réaliser des recherches et des essais pilotes. C'est dans ce contexte que ce projet de maîtrise a été réalisé.

Comme rapporté dans la littérature, l'électrocoagulation se démarque de la coagulation classique et physico-chimique par la formation de floccs contenant moins d'eau, généralement plus résistants au cisaillement et plus facilement filtrables (Canizares et al., 2009). Ce sont des facteurs très positifs dans le processus de récolte envisagé par l'équipe de recherche de la CRIEB de l'UQTR. La production de floccs plus stables et résistants après un traitement E.C. augmenterait l'efficacité de la filtration sur le filtre-presse des machines à papier et c'est ce que le présent projet de maîtrise vise à démontrer.

1.8 But, hypothèses et objectifs de recherche

Le but du projet est d'évaluer l'efficacité de la technologie d'électrocoagulation Ecothor^{MD} sur deux souches de microalgues. Basées sur la revue de littérature, les hypothèses de travail sont les suivantes :

- Le procédé Ecothor^{MD} est plus performant (% de récupération, % de siccité) lorsque la concentration initiale est plus élevée et que la différence de potentielle aux électrodes est basse;
- La performance d'Ecothor^{MD} pour la récolte et la déshydratation des microalgues est diminuée par la présence de nutriments (nitrates, phosphate) en excès après un cycle de production;
- L'électrocoagulation avec Ecothor^{MD} n'altère pas l'intégrité de la paroi cellulaire des algues. La condition de la paroi est un élément important pour la concentration en deuxième étape et pour l'extraction des molécules lipidiques;
- Ecothor^{MD} permet de s'affranchir de polymères coûteux et souvent toxiques à ajouter dans les autres procédés tels que l'extraction avec des agents flocculants et dans le procédé DAF.

Pour vérifier ces hypothèses, les objectifs de recherche suivants sont proposés :

- Mesurer la performance du procédé d'électro-coagulation selon la concentration initiale de la biomasse (1,5, 1,0, 0,5 et 0,15 g/L);
- Évaluer la performance de la récolte sur une culture en carence de nutriments (nitrates, phosphate, oligo-éléments) et sur une culture en excédant de nutriments;

- Observer au microscope électronique la structure des microalgues et l'intégrité de la cellule;
- Estimer les coûts de l'électrocoagulation en comparaison au coût des autres procédés traditionnels (centrifugeuse, filtration, de flottation à air dissous DAF).

Chapitre 2 - Matériels et méthodes

2.1 Méthodologie

Les essais en laboratoire sur différentes biomasses algales ont été réalisés pour déterminer la concentration des algues avant et après le traitement d'électrocoagulation. La densité est calculée, en gramme/litre, en récupérant les microalgues par la filtration de prélèvements de 5 millilitres de : 1) la culture de départ; 2) la phase flottante et/ou précipitée après 60 minutes de décantation à la température de la pièce et sans agitation; 3) la phase liquide après décantation.

Le coût du traitement EC a aussi été calculé pour le comparer aux autres types de récolte. Pour cela, les facteurs suivants ont été considérés : 1) coûts de l'électricité d'ionisation, du peroxyde d'hydrogène et de la filtration; 2) consommation de l'anode.

2.2 Souches de microalgues et production de la biomasse algale

2.2.1 Consortium VERTECH

Deux différentes cultures de microalgues ont été utilisées dans ce travail. L'une d'elle est une culture d'un consortium robuste d'algues-bactéries appelé VERTECH (Figure 19). Ce consortium a été développé par l'équipe de l'UQTR dans le cadre du projet pilote VERTECH I. Il est dominé par des algues vertes du genre *Chlorella* sp. dont le profil lipidique est majoritairement constitué de C12 :0 et de C14 :0 (Bourdeau et al., 2014; Bélanger-Lépine et al., 2014).



Figure 19 Consortium VERTECH Chlorella sp.-bactéries³

Les chlorelles de la famille des chlorophycées se distinguent des autres végétaux par une exceptionnelle concentration en chlorophylle et par leur capacité à former des associations symbiotiques avec certains animaux tels le zooplancton ou plancton animal. La souche VERTECH est adaptée à un milieu de culture fait d'un mélange des eaux usées de rejets industriels (industries agroalimentaire, pharmaceutique et chimique).

La culture de la souche VERTECH a été préparée d'abord en laboratoire dans des fioles Erlenmeyer de 1L contenant 500 ml de milieu de culture Bold Basal (Bischoff et Bold, 1963). Une dizaine de bouteilles étaient agitées pendant 4 jours à l'aide d'un agitateur orbital à 130 tr/min. Un tube fluorescent fournit de l'éclairage 12h/jour avec une intensité de $20 \mu\text{mol photons.m}^{-2}.\text{sec}^{-1}$ et la température de l'incubateur est contrôlée à 24 °C. Ensuite, la culture était transférée dans un aquarium d'une capacité de 100 litres équipé d'agitateurs elliptiques et d'un éclairage artificiel (Figure 20).

³ Source : Photo prise dans le labo de l'CIPP Microscope optique AXIO scope A (amplification 400X)

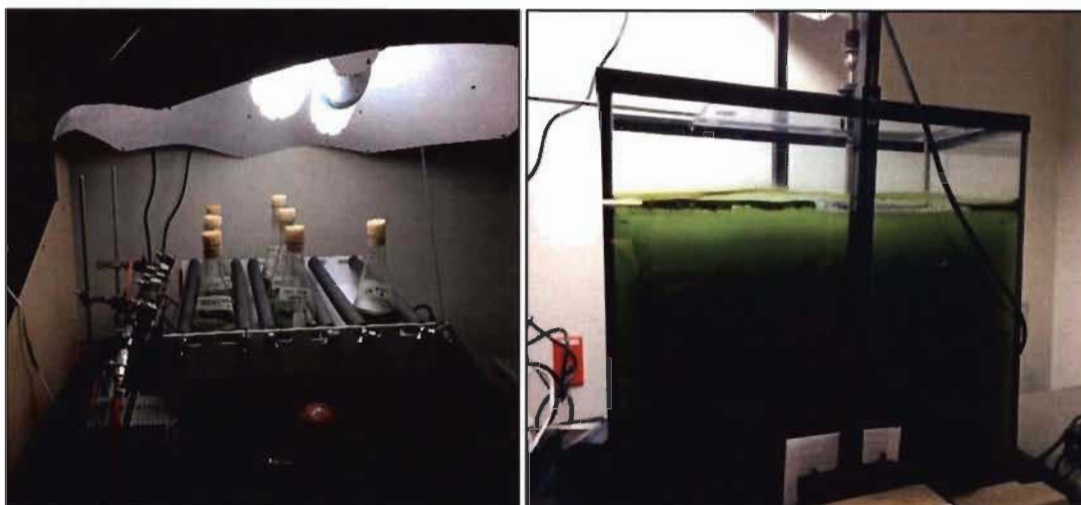


Figure 20 Préparation initiale du bouillon de culture de microalgues en fioles et en aquarium.

Lorsque la culture a atteint une opacité élevée dans l'aquarium, un transfert est effectué dans un photobioréacteur d'une capacité de 400 litres (Figure 21). Un agitateur maintient le contenu de la cuve en mouvement et une lampe fournit l'intensité lumineuse identique à celui des expériences en fioles. La culture est finalement transférée dans un bassin de démonstration de 10 000 litres Alga-Fuel™ (Figure 21) pour une production massive à l'échelle pilote de 1% d'une petite usine commerciale. Les dimensions du bassin pilote sont de 1,5 m de rayon par 1,5 m de hauteur pour un volume total d'environ 10 m³ (Dubois-Caléro et Magnin, 2011).



Figure 21 Photobioréacteur artisanal de 400 litres et bassin pilote Alga-Fuel™ de 10 m³.

2.2.2 Algues filamenteuses indigènes

La seconde culture utilisée était constituée d'une algue indigène ayant contaminée une production en bassin pilote du projet VERTECH et ayant persistée pendant plusieurs semaines. Une mousse vert foncé était apparue en surface dans le bassin de culture. Selon des observations microscopiques, il s'agirait d'une algue verte filamenteuse qui ressemble aux cyanobactéries du genre *Stigonema* sp. (Figure 22).

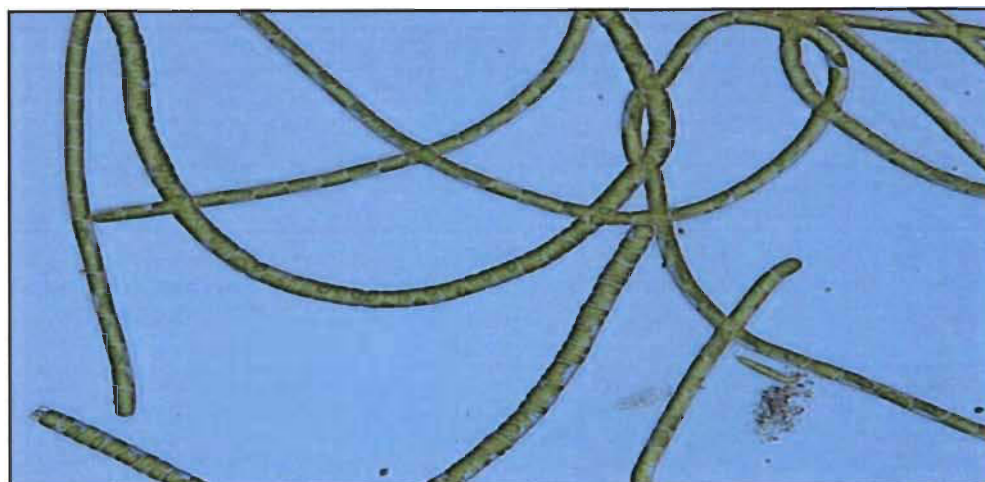


Figure 22 Algues vertes filamenteuses indigènes (600x).

2.3 Cellule d'électrocoagulation EcothorMD

Le procédé d'électrocoagulation-flottation est bien connu et utilisé efficacement pour le traitement des eaux usées. Il s'agit, dans cette recherche, d'adapter ce traitement pour la récolte des microalgues prolifiques dans un substrat d'eaux usées riches en matières organiques et en nutriments compatibles avec la souche d'algue utilisée.

Une entreprise de Sherbrooke, E2Metrix Inc. spécialisée dans la conception et le développement d'équipements de haute technologie pour le traitement des eaux usées industrielles, municipales et domestiques, a développé pour notre recherche, une unité d'électrocoagulation basée sur la technologie ECOTHOR^{MD} (Figure 23). Le réacteur ECOTHOR^{MD} est une cellule utilisant les principes de l'électrolyse. En appliquant une tension électrique sur deux électrodes, un courant électrique continu traverse de l'anode sacrificielle vers le pôle négatif en émettant dans milieu aqueux des ions hydroxydes métalliques et de l'hydrogène gazeux. La cathode est en acier galvanisé à l'extérieur et la métallurgie de l'anode sacrificielle nous est inconnue puisqu'elle est en instance de brevet sous l'acronyme ANO2M. Compte tenu de la matière en suspension à récolter et de la composition des électrodes, les particules se retrouveront au fond de la cellule et/ou seront entraînées par les bulles de gaz à la surface, comme le font les unités DAF (Dissolved air flotation). La flottation à air dissous est un procédé de traitement des eaux usées qui retire les huiles ou les matières solides en suspension.



Figure 23 Cellule de laboratoire Ecothor^{MD}.

L'enlèvement est obtenu en dissolvant sous pression de l'air dans des eaux usées, en relâchant de l'air comprimé à la pression atmosphérique dans un bassin ou réservoir de flottaison. L'air libéré forme de minuscules bulles adhérent à la matière en suspension provoque la flottation des matières en suspension à la surface de l'eau d'où elle pourra ensuite être enlevé par un dispositif d'écumage. La Figure 15 dans la section revue de littérature illustre bien ce phénomène ; les trois phases sont présentes, la boue se dépose et les floccs flottent en surface. La composition et la densité des floccs et de la boue sont bien différentes puisque le mécanisme de séparation par électrocoagulation-flottation agit de façon différente. La technologie ECOTHOR^{MD} utilisée pour le traitement des eaux usées dans certaines municipalités donne d'excellents résultats sans l'utilisation coûteuse de produits chimiques. Le manufacturier E2Metrix Inc rapporte qu'avec un réacteur ECOTHOR^{MD}- 6R d'une capacité de traitement de $0-100 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$, les matières en suspension seraient réduites de 99.5% et le phosphore réduit de 98.7%. En comparaison, l'usine de traitement des eaux usées et pluviales de la ville de Montréal utilise à grands frais un traitement physico-chimique pour éliminer la majeure partie des particules en suspension et les phosphates dans l'eau. Les contaminants en suspension stable dans les eaux usées ne décanteraient pas sans l'ajoute de coagulants chimiques tels que le chlorure ferrique, l'alun ou autresel ferrique, en amont

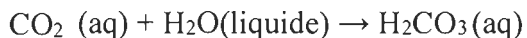
des filtres. Les fines particules sont déstabilisées et cherchent alors à coaguler et à s'agglomérer. La station d'épuration rejette au fleuve un effluent contenant environ 20 mg/L de matières en suspension et 0,5 mg/L de phosphore total sur la base des concentrations moyennes annuelles. Les résultats obtenus avec la technologie ECOTHOR^{MD} donneraient un effluent de 4 mg/L en MES et de 0.02 mg/L en phosphore. La comparaison est bien théorique compte tenu de la quantité d'eau à traiter mais tout de même demeure intéressante.

Les microalgues portent une charge négative lorsqu'un champ électrique est appliqué au bouillon de culture. Elles peuvent former des précipités sur les électrodes (électrophorèse), s'accumuler au fond de la cellule (électrocoagulation) ainsi qu'être entraîné à la surface par l'hydrogène gazeux produit quand l'électron libre qui se dépose sur la cathode (électroflottation).

La molécule d'eau à l'anode est oxydée produisant de l'oxygène en libérant quatre électrons et quatre ions d'hydrogène : $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$.

La réaction principale à la cathode est la réduction de l'eau en libérant de l'hydrogène gazeux et des radicaux OH^- selon la formule suivante : $2 \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2 \text{OH}^-$.

Le pH augmente régulièrement au cours du processus d'électrocoagulation jusqu'à un pH très basique. Cette augmentation du pH est due à la formation à la cathode d'ions hydroxydes provenant de la réaction de réduction des molécules. Cette propriété du traitement E.C. pourrait devenir un avantage intéressant dans un procédé de production de microalgues où l'injection de dioxyde de carbone. En effet, le CO_2 résiduel dissous augmente l'acidité de l'eau ; il se forme en particulier par solvation du dioxyde de carbone:



L'acide carbonique est un acide faible qui pourrait quelque peu neutraliser le pH basique de l'eau résiduelle après la récolte de la biomasse. C'est une molécule instable mais tout de même problématique quand le CO_2 est injecté à grande échelle dans l'eau ; phénomène responsable de l'acidification des océans avec l'augmentation des émissions de gaz à effet

de serre. En contrôlant l'intensité du courant continu appliqué à l'anode, le dosage de coagulant peut être ajusté afin de contrôler les paramètres de traitement.

La cellule d'électrocoagulation est alimentée sur le réseau domestique de Hydro Québec à 120 volts, 60 hertz, et triphasé. Un convertisseur de courant alternatif-continu comporte un premier circuit redresseur ayant une entrée triphasée et une sortie en continu. Le voltage est maintenu à 10 volts durant toute la période de traitement. L'ampérage varie selon la conductivité de la culture durant le traitement proportionnellement à la densité des matières en suspension. Des lectures sont prises à chaque minute pour en tirer une moyenne. L'énergie utilisée est calculée pour chaque essai selon la formule suivante :

$$\text{Ampérage} \times \frac{\text{volt}}{1000} \times \frac{\text{période}}{4} = \text{Énergie(Kwh)}$$

2.4 Décantation de la biomasse algale et prélèvement

La biomasse est prélevée manuellement dans le bassin de culture alors qu'un échantillon de 1,5L est transvidé dans le réacteur d'électrocoagulation. Un échantillon du même prélèvement a été gardé sans agitation durant la même période dans un cylindre gradué pour servir de référence avec le tube de décantation (Figure 24).



Figure 24 Cylindre témoin et prélèvement.

Prélevées après le traitement d'électrocoagulation, les microalgues se déposent principalement au fond du tube et selon le type d'algue, la concentration de la culture et l'utilisation ou non de peroxyde, une mousse se forme à la surface après une période de décantation d'une trentaine de minutes. La mousse est spongieuse puisqu'elle a été entraînée à la surface du liquide partiellement par des bulles de gaz et par flottation gravitationnelle. Il demeure des matières en suspension qui hésitent entre se déposer ou flotter. Avec une période de décantation plus longue la phase aqueuse se clarifie quelque peu sans devenir translucide. La Figure 25 ci-dessous montre deux exemples parmi une cinquantaine d'essais qui démontrent bien la variabilité des résultats selon la souche de microalgues utilisée.



Figure 25 Algue filamenteuse et souche VERTECH.

2.5 Filtration avec aspiration sous vide partiel

La biomasse sèche concentrée par le procédé ainsi que l'eau résiduelle des essais ont été filtré et séché afin de mesurer le rendement et de réaliser le bilan de masse du procédé (Figure 26).



Figure 26 Montage pour la filtration

Des papiers filtres Whatman de 22 μm ont été utilisés avec aspiration sous vide. Ces filtres donnent une excellente rétention des particules grossières et des précipités gélamineux comme hydroxyde ferrique et d'hydroxyde d'aluminium. Les filtres sont séchés au four à 105 °C et pesés à la température de la pièce avant la filtration des échantillons. Une autre pesée est effectuée après la filtration sous un vide partiel et le séchage à 105 °C. Nous obtenons, par différence et conversion en g/L, le poids réel de la récolte. Par exemple, à partir d'une culture de microalgues de 0.7g/litre de densité, le traitement d'électrocoagulation a donné une récolte de 17.4 g/litre (voir Tableau 4 de la section Résultats). La densité de l'eau résiduelle aurait donc été réduite à 0.3g/litre.

Chapitre 3 - Résultats

3.1 Paramètres

Une charge de 10 ampères traverse la solution d'algues en suspension durant une période continue de 15 minutes. La formation d'ions métalliques provoque la coagulation des algues qui se déposent au fond et/ou flottent à la surface, réduisant ainsi la densité de la culture. Le voltage enregistré tout le long de l'électrocoagulation diminue au fur et à mesure de la séparation des phases. En commençant à 6,51 volts, il diminue à 3,05 à la fin de la période de 15 minutes. De même pour le traitement avec le peroxyde, le voltage passe de 4 à 2,71. La conductivité électrique est fonction de la turbidité de la culture. Selon la loi d'Ohm, la résistance passe de 0,65 à 0,3 ohms et de 0,4 à 0,27 avec le H₂O₂. La moyenne de conductivité de tous ces essais a été de 10,61 mS.cm⁻¹ (milli Siemens par centimètre). Le potentiel hydrogène moyen (pH) a été de 11,02 et la turbidité de 4257 NTU.

3.2 Récolte de la biomasse du consortium VERTECH

Nous avons procédé à 16 essais d'électrocoagulation en laboratoire sur une culture d'algues provenant du bassin de culture Alga-Fuel™. La récolte moyenne des 9 premiers essais a été de 17,48 g/litre. Pour les 7 autres essais qui ont été réalisées avec du peroxyde d'hydrogène, la récolte a été de 30,75 g/litre.

Le résultat du test #50222, présenté au Tableau 5 et à la Figure 25, est représentatif d'une récolte d'algues du Consortium VERTECH après un traitement d'électrocoagulation et la compilation de l'essai #50223 sur le même consortium (Tableau 6 et Figure 25) représente les résultats de la récolte pour l'E.C. avec l'injection de peroxyde.

Tableau 5 Récolte de la biomasse VERTECH.

| Nom de l'essai :50222 | | | | | | |
|-----------------------|---------|---------|---------|--------|---------------|-------------------------------|
| Temps | Courant | Voltage | pH | T | Conductivité | Observations |
| min | A | V | - | °C | mS/cm | |
| 0 | 0 | 0,00 | 6,95 | 19,2 | 9,04 | Une mousse blanche |
| 5 | 10 | 5,93 | 10,75 | 19,3 | 8,38 | s'est précipité dans le fond |
| 10 | 10 | 4,24 | 11,25 | 19,8 | 8,63 | Formation de dépôt noir |
| 15 | 10 | 3,05 | 11,34 | 20,7 | 8,71 | Culture très claire au départ |
| | 10 | 4,41 | | | | |
| énergie | | 0,01102 | | | | |
| Kw hr | | | | | | |
| Pesée | vide | fin | net-sec | moy | concentration | |
| T0 | 2044,1 | 2047,6 | 3,5 | 3,5 | 0,7 | T0 : culture de départ |
| H1 | 2134,7 | 2137,2 | 2,5 | | | H: eau résiduelle |
| H2 | 2024,4 | 2026,1 | 1,7 | | | |
| H3 | 2114,0 | 2114,3 | 0,3 | 1,5 | 0,3 | |
| B1 | 2021,5 | 2096,8 | 75,3 | | | B :récolte de Biomasse |
| B2 | 2122,0 | 2215,0 | 93 | | | |
| B3 | 2156,4 | 2249,1 | 92,7 | 87 | 17,4 | |
| | mg | mg | mg/5ml | mg/5ml | g/L | |

Tableau 6 Récolte de la biomasse VERTECH avec peroxyde

| Nom de l'essai :50223 Peroxide | | | | | | |
|--------------------------------|---------|---------|---------|--------|---------------|--|
| Temps | Courant | Voltage | pH | T | Conductivité | Observations |
| min | A | V | - | °C | mS/cm | |
| 0 | 0 | 0 | | | | 80ml de H ₂ O ₂ à 36% dans |
| 5 | 10 | 3,04 | 9,53 | 21,9 | 8,25 | 1420ml de culture |
| 10 | 10 | 2,87 | 10,02 | 23,3 | 8,82 | Formation d'une belle mousse |
| 15 | 10 | 2,71 | 10,2 | 25,9 | 9,32 | spongieuse en surface |
| | 10 | 2,87 | | | | Émission de vapeur à la |
| Énergie | | | | | | vidange du réacteur |
| Kw hr | | | | | 0,0072 | |
| Pesée | Vide | Fin | Net-sec | moy | concentration | |
| T 0 | 2120,0 | 2121,0 | 1,0 | 1,0 | 0,2 | T 0 : Culture de départ |
| H1 | 2142,2 | 2144,8 | 2,6 | | | H: eau résiduelle |
| H2 | 2006,3 | 2009,8 | 3,5 | 3,1 | 0,62 | |
| B1 | 2146,2 | 2276,2 | 130,0 | | | B: biomasse |
| B2 | 2008,4 | 2155,6 | 147,2 | 138,6 | 27,72 | |
| | mg | mg | mg/5ml | mg/5ml | g/L | |



Figure 27 Récolte avec la biomasse VERTECH sans et avec H₂O₂.

L'ajout de 80 mL de peroxyde à un échantillon de 1,420 L de culture a provoqué, à la cathode, la formation d'une plus grande quantité de bulles d'hydrogène entraînant vers la surface du liquide, une mousse spongieuse. À partir d'une concentration, avant le traitement E.C. de 0.2 g/L, la densité de la mousse fut de 27,7 g/L et la phase liquide a été d'une densité de 0,62 g/L. L'ajout de peroxyde d'hydrogène a presque doublé la récolte de biomasse par rapport à l'essai # 50222. Pour avoir un portrait réel de la récolte de biomasse algale il faut y soustraire le poids des ions de magnésium-aluminium présents dans la récolte. La consommation moyenne d'anode pour l'électrocoagulation sans peroxyde est de 69.65g pour 1 kg de récolte et de 39.7 g avec 60ml de peroxyde. Un faible pourcentage se retrouve dans l'eau résiduelle et la majorité dans la biomasse. Nous pouvons conclure que la récolte de biomasse contient moins de 7% ou 4% de coagulant pour le traitement avec peroxyde.

3.3 Récolte de biomasse du consortium d'algues filamenteuses indigènes

Pour les mêmes conditions de traitement, le consortium d'algues filamenteuses indigènes (Figure 26) a donné une récolte deux fois plus abondante que la souche VERTECH.

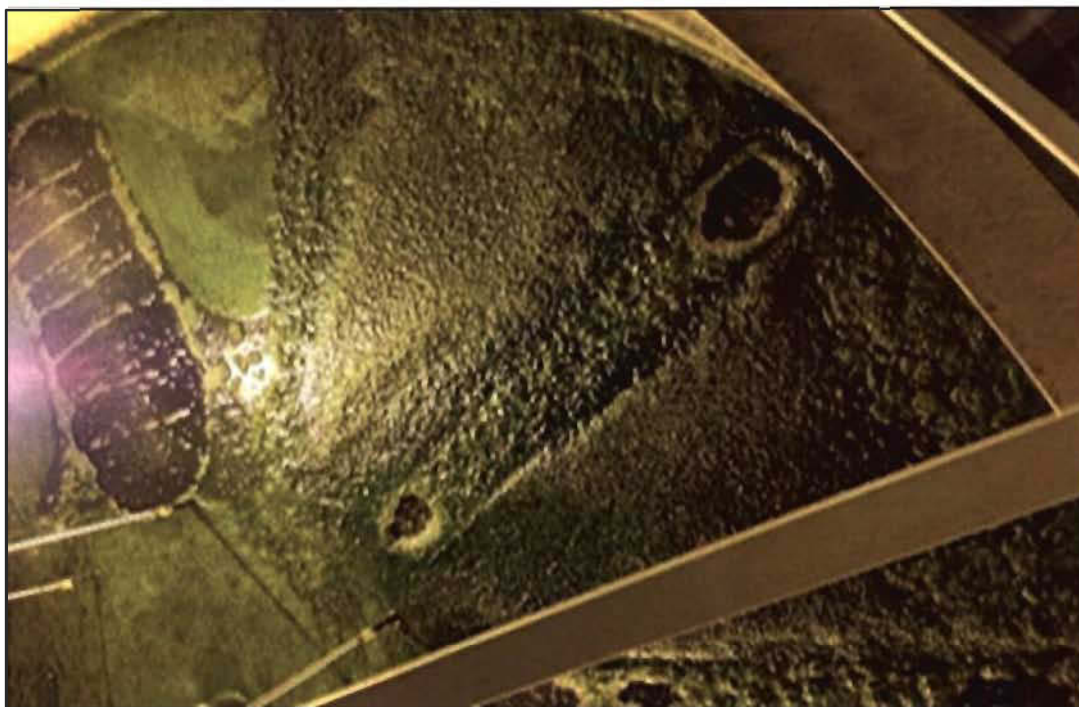


Figure 28 Microalgues filamenteuses indigènes dans le réacteur Algafuel™.

La moyenne sur les 22 essais effectués sur cette souche d'algue a été de 53,07 g/litre. Par contre, la performance avec le peroxyde a été moins significative que dans le cas des essais sur la souche VERTECH. L'effet oxydant du H_2O_2 semble briser la paroi des chainettes de cellules et diminuer la coagulation. De plus, une portion des algues filamenteuses se déposent rapidement en surface tandis que le reste se précipite au fond du tube après une période de décantation. Il y a donc trois phases de séparation ce qui rend la récolte plus difficile. Les essais #50260 et #50261 comparent le rendement de la récolte avec l'ajout ou non de peroxyde (Tableau 7; Figures 29, 30 et 31); les autres facteurs demeurent égaux.

Tableau 7 Comparaison du rendement de la récolte avec ajout ou non de peroxyde d'hydrogène.

| Nom de l'essai : 50260 Culture d'algues filamenteuses, indigènes. | | | | | 2015-12-10 |
|---|---------|---------|----------|---------|---|
| Temps | Courant | Voltage | | | Observations |
| min | A | V | | | |
| 0 | 0 | 0 | | | |
| 15 | 10 | 3,88 | | | 1500 ml de culture filamenteuse |
| | | | | | Bonne densité et surnageant moyen (P-1,2) |
| Énergie | 10 | 3,88 | | | Consommation d'anode: 2,86gr (P-3) |
| | 0,01 | kWh | | | La séparation des phases après seulement 5 min. de décantation (P-4) |
| Pesée | vide | fin | net-sec | densité | |
| T | 1051,7 | 1055,5 | 3,8 | 0,76 | Séparation très nette après 1 heure de décantation. Les algues se sont précipitées. |
| O | 1067 | 1068,1 | 1,1 | 0,22 | Peu de flottaison et de matière |
| B | 1062,9 | 1283,7 | 220,8 | 44,16 | En suspension (P-5). |
| | mg | mg | mg/5ml | g/L | |
| Nom de l'essai : 50261 Culture filamenteuse | | | | | 1450ml de culture et 50ml de peroxyde |
| Énergie | 10 | 3,42 | | | |
| | 0,009 | kWh | | | |
| Pesée | vide | fin | net-sec | densité | |
| T | 1051,7 | 1055,5 | 3,8 | 0,76 | |
| O | 1038,5 | 1053,5 | 15 | 3 | Les algues ont flotté à la surface et sont demeurées en suspension (P-6) |
| B | 1076,1 | 1195,9 | 119,8 | 23,96 | |
| | mg | mg | mg/5ml | g/L | La quantité récoltée est très faible |
| Filtration sans E.C. sur 500ml de culture | | | | | |
| O | 1064,7 | 1068,2 | 3,5 | 0,7 | L'eau résiduelle contient 3 fois moins d'algues qu'avec le traitement d'E.C. |
| B | 1248,1 | 1596,6 | 348,5 | 0,697 | |
| | mg | mg | mg/500ml | g/L | |

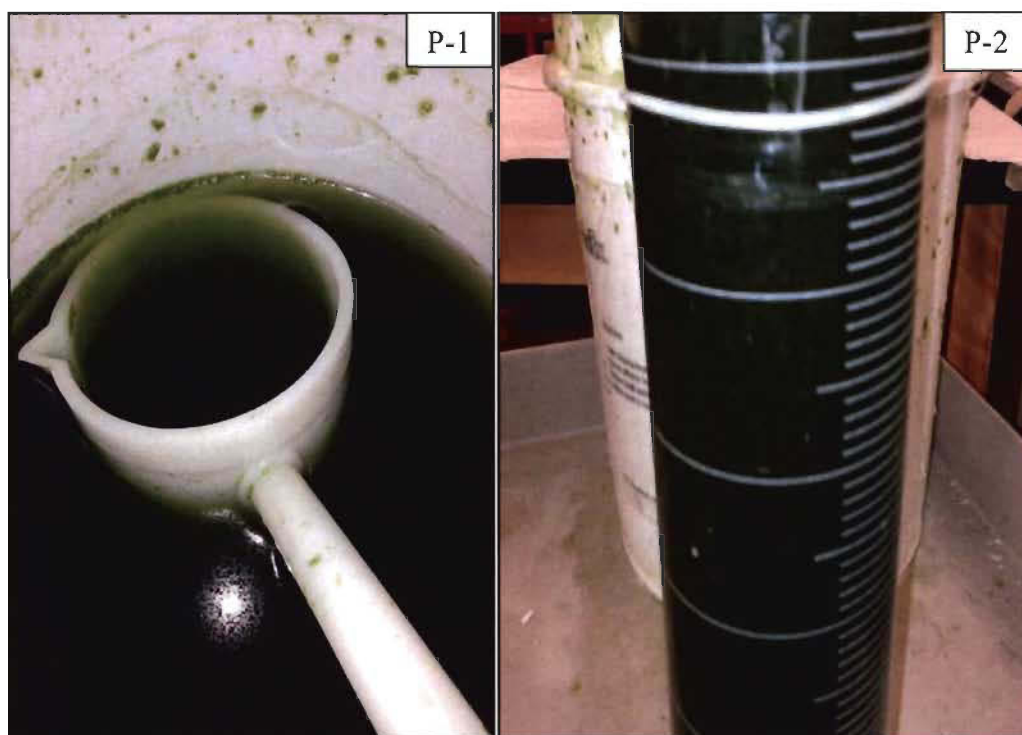


Figure 29 Culture d'algues filamenteuses.

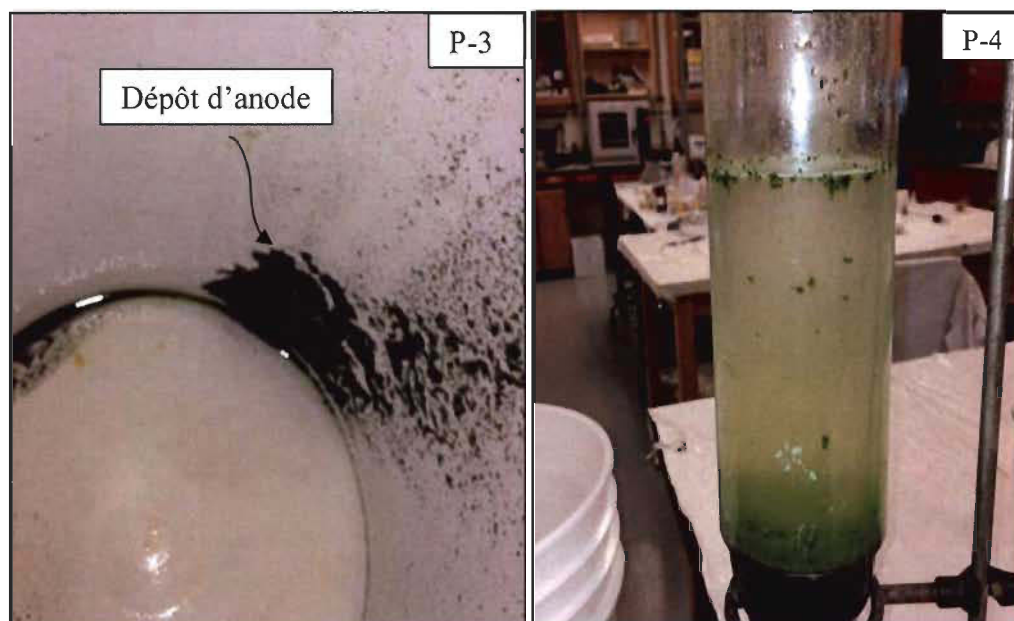


Figure 30 Dépôt à l'anode et séparation de la biomasse après 30 minutes.

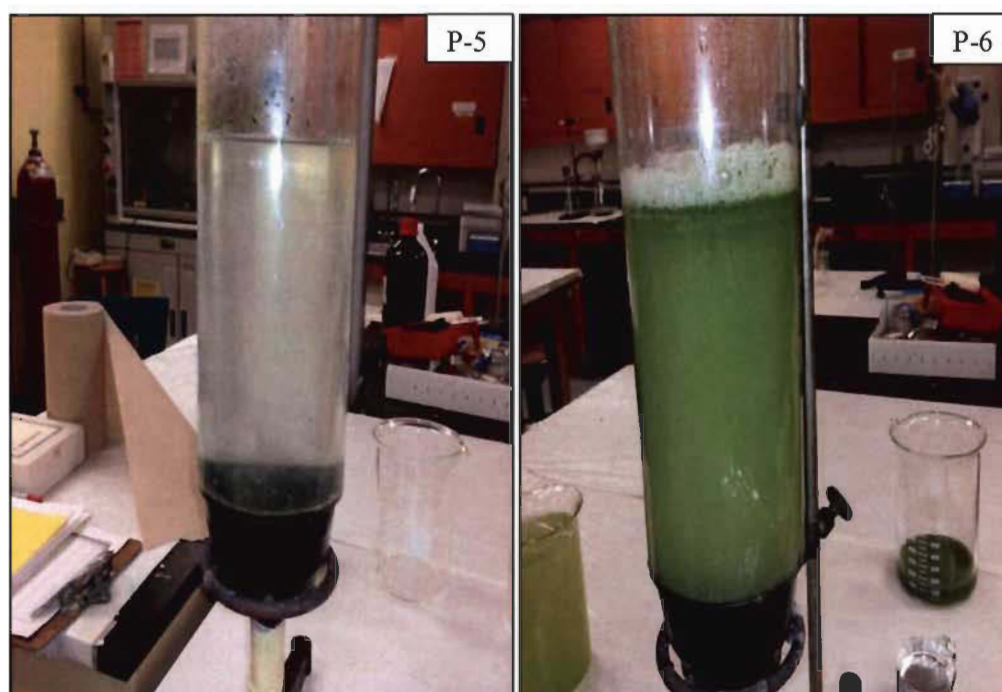


Figure 31 Séparation de la biomasse après 60 minutes et séparation avec peroxyde.

L'essai # 50272 (Tableau 7; Figures 32 et 33) a été réalisé sur un échantillon de 1,5 L d'une culture de microalgues filamenteuses indigènes d'une densité initiale de 1,22g/L. Sans ajout de peroxyde, l'essai donne une nette séparation des phases. Une partie s'est précipitée au fond et l'autre est montée à la surface. La densité du dépôt est de 42,88 g/L, la mousse a une densité de 28g/L et l'eau résiduelle contenant de matières en suspension une concentration de 0.65g/L.

Tableau 8 Résultats avec les algues filamenteuses indigènes.

| Nom de l'essai: 50272 culture indigène, filamenteuse 2016-02-18 | | | | | | |
|---|--|---------|--------|-------|-------|---|
| Temps | Courant | Voltage | | | | Observations |
| min | A | V | | | | |
| 15 | 10 | 3,4 | | | | 1500ml de culture très concentrée |
| | | | 0,25 | 0,001 | | (P-1) |
| Énergie | 0,0085 | KwH | | | | |
| | | | | | | Séparation lente des phases avec |
| T | 1077,7 | 1083,8 | 6,1 | | 1,22 | petit colet de mousse après E.C. (P-2) |
| O | 1080,8 | 1083,3 | 2,5 | | 0,5 | Séparation nette des phases après |
| B-1 | 1060,2 | 1274,6 | 214,4 | | 42,88 | 30 min. Partie flottante, précipité (P-3) |
| B-2 | 1062,2 | 1202,2 | 140 | | 28 | Séparation des phases après 45 min. |
| | mg | mg | mg/5ml | | g/l | (P-4) |
| | | | | | | Très faible décantation naturelle |
| | | | | | | après 3 hrs (P-5) |
| | T: concentration avant E.C. | | | | | |
| | O: concentration dans l'eau résiduelle | | | | | |
| | B-1: concentration dans la biomasse | | | | | |
| | B-2 : concentration de la mousse | | | | | |

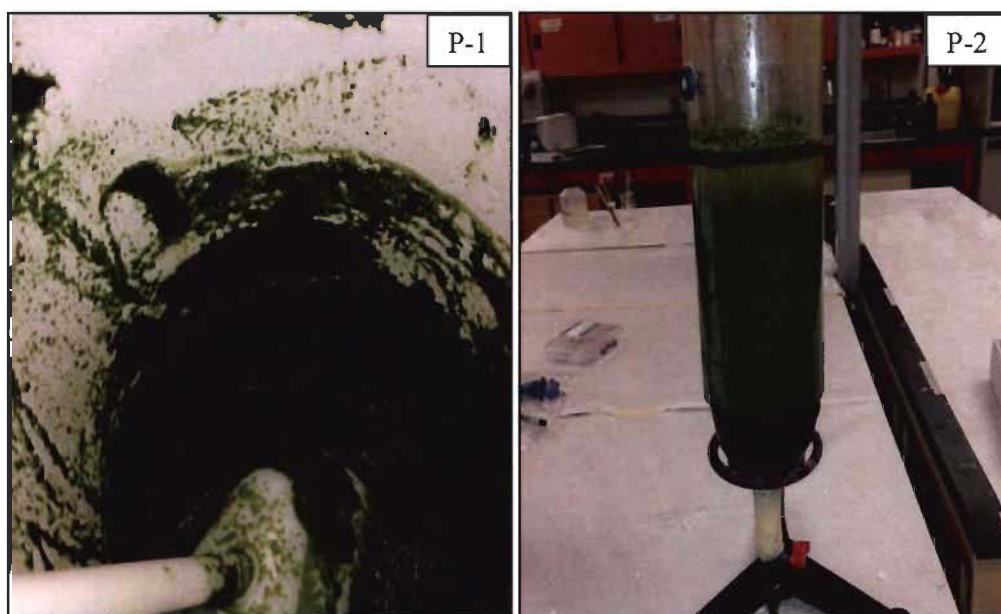


Figure 32 Culture concentrée de l'algue indigène (P-1) et collet de mousse formé après séparation (P-2).

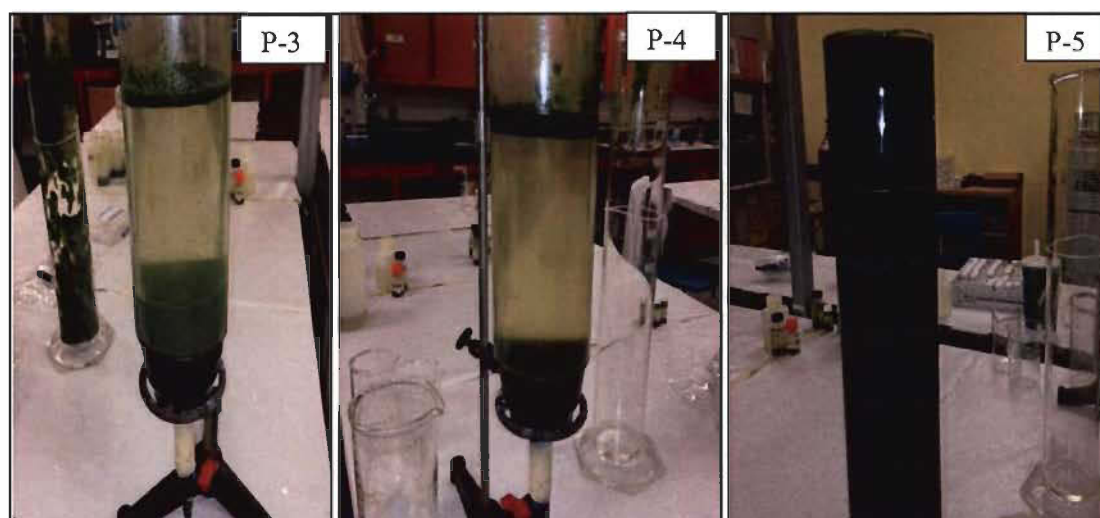


Figure 33 Séparation après 30 min (P-3), 45 min (P-4), sans traitement (P-5).

L'essai #50273 (Tableau 9; Figure 34), est un autre exemple des résultats comptabilisés pour la récolte des algues filamenteuses après un traitement d'électrocoagulation. Une charge de 10 ampères à traverser la solution d'algues en suspension durant une période continue de 15 minutes. Le passage des électrons a provoqué la précipitation des algues rendant la solution plus limpide ; s'en suivi une diminution graduelle de la conductivité de la solution. La conductivité moyenne durant le test a été de 0.38 ohms mesurée aux pôles pour un voltage moyen de 3,78 volts. La concentration de microalgues dans la culture de

départ ($T_0=1,02$ g/L) est passée après l'électrocoagulation à ($B= 96,1$ g/L), laissant en suspension dans l'eau résiduelle que ($O= 0,6$ g/L). La décantation naturelle est très faible (P-5). Pour la même période de décantation, le traitement E.C. produit clairement une excellente récolte (P-5 vs P-4).

Tableau 9 Résultats avec les microalgues filamenteuses indigènes.

| Nom de l'essai: 50273 algues indigènes, filamenteuses 2016-03-03 | | | | | | |
|--|--|---------|---------|-------|---------|--------------------------------------|
| Temps | Courant | Voltage | | | | Observations |
| min | A | V | | | | |
| 15 | 10 | 3,78 | | | | 1500ml de culture très concentrée |
| | | | 0,25 | 0,001 | | (P-1) |
| Énergie | 0,0095 | KwH | | | | Augmentation rapide de la conduc- |
| Pesée | vide | fin | net-sec | | densité | tivité dans les 3 premières min. |
| T | 1029,4 | 1034,5 | 5,1 | | 1,02 | |
| O | 1061,6 | 1064,6 | 3 | | 0,6 | Très peu de dépôt d'électrode (P-2) |
| B | 1045,3 | 1525,8 | 480,5 | | 96,1 | |
| | | | | | | Précipitation rapide après 30 min. |
| | mg | mg | mg/5ml | | g/l | (P-3) |
| | | | | | | Séparation nette des phases (P-4) |
| | | | | | | Conclusion: |
| | T: concentration avant E.C. | | | | | La décantation naturelle est très |
| | O: concentration dans l'eau résiduelle | | | | | faible (P-5) comparée, pour le temps |
| | B : concentration dans la biomasse | | | | | de décantation , à la culture après |
| | | | | | | E.C. (P-4) |

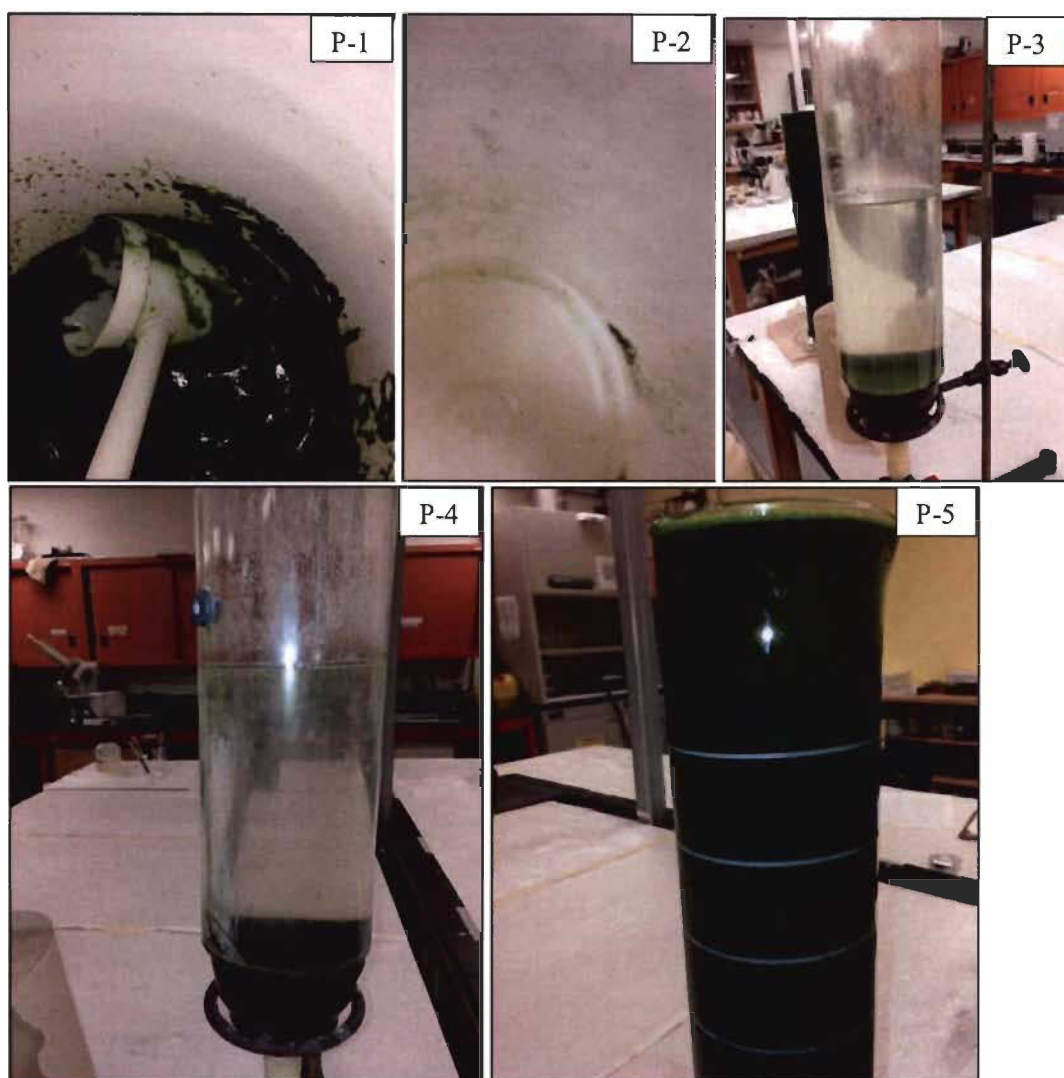


Figure 34 Culture filamenteuse (P-1), dépôt d'anode (P-2), précipitation (P-3), séparation (P-4) et décantation naturelle (P-5).

La densité des algues concentrées par le traitement d'E.C. ainsi que la quantité d'énergie requise de l'ensemble des essais est présentée au Tableau 10.

Tableau 10 Résultats des essais après E.C.

| Essai # | VERTECH | VERTECH +H ₂ O ₂ | FILAMENT | FILAMENT +H ₂ O ₂ | ÉNERGIE |
|---------|----------------------|---|----------|--|---------|
| | Densité finale (g/L) | | | | kWh |
| 50215 | 22,15 | | | | 0,0165 |
| 50216 | 8,34 | | | | 0,0251 |

| Essai # | VERTECH | VERTECH +H ₂ O ₂ | FILAMENT | FILAMENT +H ₂ O ₂ | ÉNERGIE |
|---------|----------------------|---|----------|--|---------|
| | Densité finale (g/L) | | | | kWh |
| 50218 | 17,82 | | | | 0,0148 |
| 50219 | 3,62 | | | | 0,0521 |
| 50220 | 9,00 | | | | 0,0312 |
| 50222 | 17,40 | | | | 0,0110 |
| 50223 | | 27,72 | | | 0,0072 |
| 50224 | 14,13 | | | | 0,0100 |
| 50225 | | 2,28 | | | 0,0086 |
| 50226 | | 60,7 | | | 0,0077 |
| 50227 | 12,99 | | | | 0,0089 |
| 50229 | | 19,59 | | | 0,0073 |
| 50230 | 15,47 | | | | 0,0093 |
| 50231 | | 7,45 | | | 0,0083 |
| 50235 | 9,88 | | | | 0,0144 |
| 50236 | | 11,76 | | | |
| 50237 | | 17,28 | | | |
| 50240 | 15,66 | | | | 0,0122 |
| 50241 | | 110,98 | | | 0,0112 |
| 50242 | | 37,04 | | | 0,0105 |
| 50243 | 14,30 | | | | 0,0114 |
| 50246 | 18,83 | | | | 0,0067 |
| 50247 | | | | 12,84* | 0,0068 |
| 50248 | 65,06 | | | | 0,0074 |
| 50250 | | | 32,36 | | 0,0102 |
| 50252 | | | 41,24 | | 0,0100 |
| 50253 | | | | 16,80* | 0,0100 |
| 50254 | | | 44,80 | | 0,0106 |
| 50255 | | | | 97,30 | 0,0094 |
| 50258 | | | 67,38 | | 0,0100 |

| Essai # | VERTECH | VERTECH +H ₂ O ₂ | FILAMENT | FILAMENT +H ₂ O ₂ | ÉNERGIE |
|--|----------------------|---|----------|--|---------|
| | Densité finale (g/L) | | | | kWh |
| 50260 | | | 44,16 | | 0,0097 |
| 50261 | | | | 23,96 | 0,0086 |
| 50262 | | | 79,30 | | 0,0086 |
| 50263 | | | 87,82 | | 0,0081 |
| 50264 | | | 40,00 | | 0,0095 |
| 50265 | | | 166,62 | | 0,0091 |
| 50266 | | | 54,04 | | 0,0096 |
| 50267 | | | 45,14 | | 0,0091 |
| 50268 | | | 18,46 | | 0,0090 |
| 50269 | | | 54,96 | | 0,0125 |
| 50270 | | | 23,38 | | 0,0106 |
| 50271 | | | 27,00 | | 0,0082 |
| 50272 | | | 42,88 | | 0,0085 |
| 50273 | | | 96,10 | | 0,0095 |
| 50275 | | | 51,04 | | 0,0116 |
| Moyenne | 17,48 | 30,75 | 56,48 | 37,73 | 0,0116 |
| Récolte : moyenne de tous les tests | 35,61g/L | | | | |
| Énergie | 0,3258 | | | | |

* La concentration de microalgues était trop faible pour considérer ces résultats dans le calcul de la récolte moyenne.

Le temps de traitement nécessaire pour récolter 1 kg serait d'environ 9,5 heures avec une seule cellule, du type E2 Metrix, utilisée pour ces tests sans ajout de peroxyde et de 5,42 heures avec 60 ml de H₂O₂ (Figure 35). Le potentiel d'électrocoagulation est fonction de la surface active de l'anode sacrificielle. L'anode utilisée en laboratoire avait au départ une aire de 549,15 cm² pour une longueur effective de 87,4cm et un diamètre de tige de 2cm (Figure 36). La composition métallurgique de cette électrode est sous brevet; mais selon la

densité mesurée en laboratoire ($2,32\text{g/cm}^3$), il se pourrait que ce soit un alliage de 60% aluminium et de 40% magnésium.

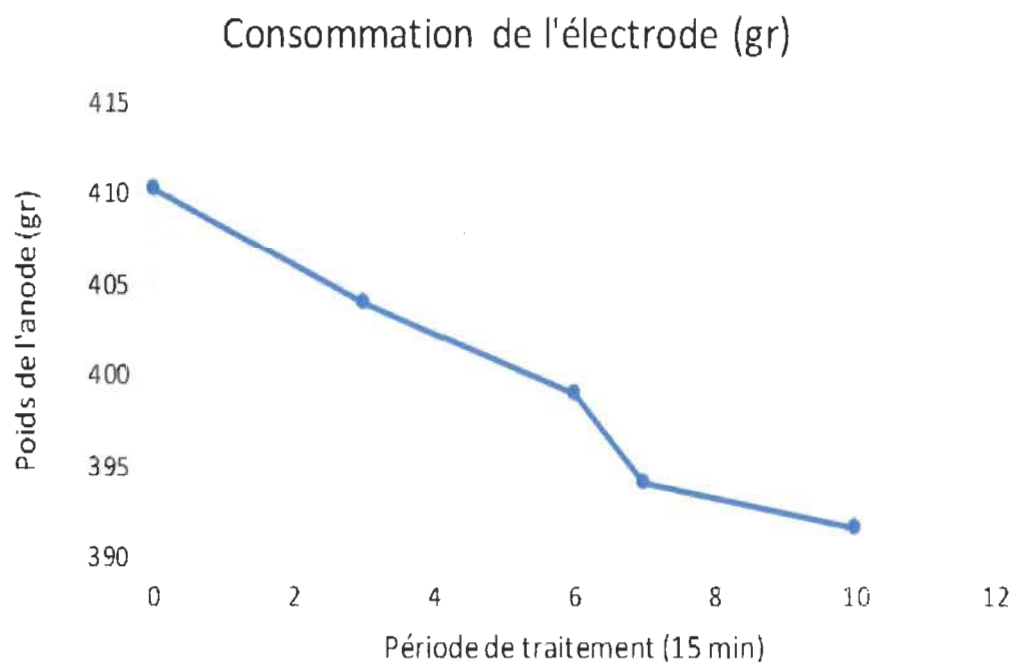


Figure 35 Consommation de l'anode par période d'électrocoagulation.



Figure 36 Anode sacrificielle.

Donc en théorie pour récolter 1 km d'algues, la surface restante serait après 9,5 heures d'utilisation de 519 cm^2 pour une consommation d'électrode de 69,65 gr. De même, pour

le traitement avec peroxyde, une récolte de 1 kg prendrait 5,42 heures et 39,7gr de consommation d'anode, La surface active serait de 532,02 cm². En utilisant la même procédure de traitement et la même technologie ; la production anticipée pour le traitement sans peroxyde de la biomasse de Consortium VERTECH serait de :

$$Production (kg) = \frac{temps(hr)}{9,5} \times \frac{surface (cm^2)}{549 + 519,2}$$

Et pour la même souche avec 60 ml de H₂O₂ de :

$$Production (kg) = \frac{temps(hr)}{5,42} \times \frac{surface (cm^2)}{549 + 532,2}$$

Ces données sont valides qu'à l'échelle laboratoire mais permettent d'estimer les besoins pour une production industrielle par simple règle de trois puisqu'il n'y a pas de raison de croire à une économie d'échelle avec cette méthode de récolte. Selon les observations, de la rugosité de la surface de l'anode après les traitements a été de 1 à 3 mm et l'uniformité de l'érosion tout le long de la tige a variée de 5 à 7 mm.

Il faudra toujours maintenir une épaisseur d'anode d'au moins 1 cm. La production, sans H₂O₂, d'une tonne de biomasse demanderait donc dans les mêmes circonstances soit 9,5 heures de traitement avec une seule cellule; 5,42 heures avec 60 ml de H₂O₂. Ou encore 1 heure de traitement avec une surface anodique de 507 m²; de 293 m² pour l'électrocoagulation avec l'ajout de peroxyde, Toutes les combinaisons de temps de traitement et de surface d'anode suivraient la même équation. Les lectures moyennes pour les tests avec les microalgues filamenteuses ont été de : avant le traitement (T=1,48g/L); eau résiduel (O=0,79g/L); biomasse récoltée (B=53,07g/L),

3.4 Utilisation de peroxyde d'hydrogène

L'ajout de 60 ml à 120 ml de H₂O₂ (34,5 à 38%) a donné une récolte de 175 % supérieur à celle du traitement sur la culture Consortium VERTECH, sans additif. L'effet n'a pas été le même sur la souche d'algues filamenteuses. Il y a eu que de faibles variations dans les rendements selon la quantité de peroxyde mais il se dégage de ces essais qu'un volume de 60 ml donne le meilleur ratio coût-bénéfice. L'injection de H₂O₂ avec les électrodes de E2

Metrix dans le procédé Ecothor^{MD} n'a pas donné la séparation observée dans le procédé ECRO (électrocoagulation-électroréduction-ozonation) selon des travaux du Centre des Technologies de l'Eau du Cégep St-Laurent à Montréal. Possiblement que la composition métallique des électrodes (Mg, Al) n'a pas la capacité coagulante des ions fer-aluminium et/ou que la grosseur de MS est plus élevée ou encore que l'ozone (O₃) soit plus efficace que le H₂O₂.

3.5 Intégrité de la paroi cellulaire des algues

Le traitement d'électrocoagulation n'a pas altéré la structure des algues. Le coagulant produit par électrolyse, étant composé d'ions métalliques, ne réagit pas chimiquement avec les cellules comme ce serait le cas avec des coagulants chimiques. Les microalgues unicellulaires qui forment un long filament de quelques dizaines à une centaine d'unités conservant l'intégrité de leur membrane et du noyau cellulaire. Ils s'enfilent dans un long tube individuel généralement constitué de glycoprotéines et de polysaccharides. La filtration de la microalgue devient plus efficace en conservant sa structure filamentaire de plus grande dimension (Figure 37).

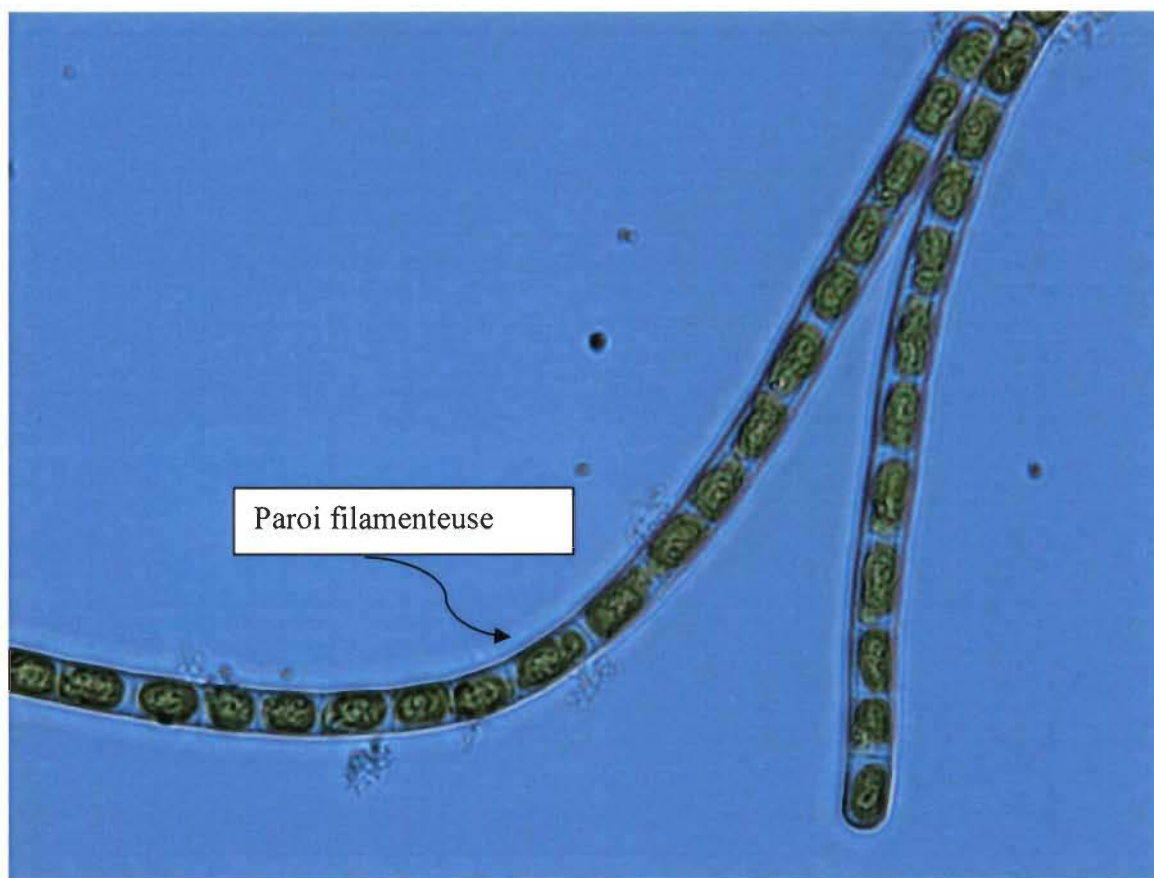


Figure 37 Algues vertes filamenteuses indigènes (source : photo prise dans le labo de l’CIPP Microscope optique AXIO scope A à une amplification de 600X).

3.6 Temps de traitement

La durée de mise sous tension de la cellule d’électrocoagulation est un facteur important, Le temps optimum est atteint lorsque la récolte est la plus abondante par rapport à l’énergie fournie. Elle est fonction de la conductivité du milieu aqueux, de l’énergie appliquée aux électrodes et de la surface utile de l’anode. Dans le cas des deux souches de microalgues analysées, pour une surface d’anode de 880 cm^2 et l’utilisation de $0,0095 \text{ kWh}$ en énergie électrique, les résultats mènent à la conclusion que la récolte est optimum après 15 minutes. Comme démontré dans la Figure 38, le voltage diminue graduellement et atteint une asymptote à $3,80 \text{ volts}$ après une période de 15 minutes.

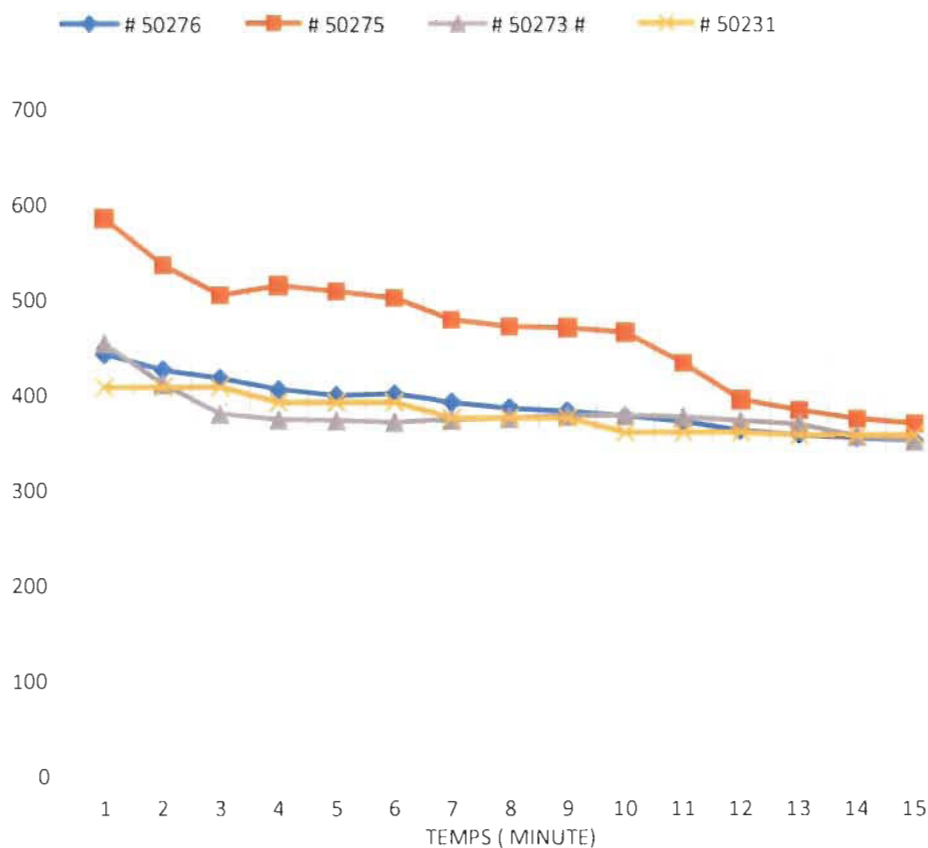


Figure 38 Variation du voltage en fonction du temps de traitement.

3.7 Période de décantation

Les échantillons prélevés après le traitement d'électrocoagulation ont été comparés à la même culture d'algue sans E.C. Le temps de séparation des phases dans les mêmes conditions de décantation est nettement plus court dans le cas des échantillons traités à l'E.C. et la récolte est nettement plus abondante. Déjà au transbordement de la cellule d'E.C. à un tube gradué, les algues se déposent et/ou montent à la surface, Après 30 minutes, la séparation des phases est nette et le liquide résiduel est clair avec très peu de flocons en suspension. L'échantillon témoin, sans le traitement, présente une séparation de phases très faible. Elle est beaucoup plus lente et il demeure beaucoup de flocons en suspension. Ceci peut être attribuable à la réaction entre les hydroxydes métalliques dissous et cellules de microalgues qui se continue quelques temps après la récolte E.C. Ce phénomène a été aussi rapporté dans la littérature (Vandamme et al, 2011).

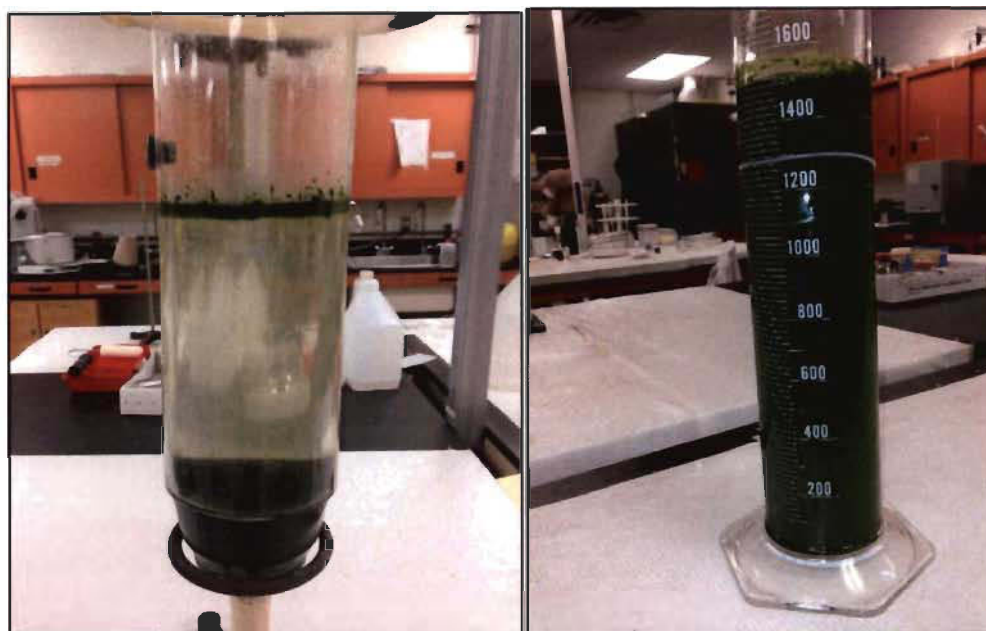


Figure 39 Décantation après ECF (30 min) et séparation sans aide (30 min).

L'efficacité de la récolte est fonction du temps de traitement et du temps de sédimentation. Tel que présenté dans le Tableau 11, pour une période de traitement de 0 à 10 minutes, l'efficacité de la séparation passe de 16% à 32% en 30 minutes. Par contre, pour une période d'ECF de 20 à 30 minutes la récolte devient très efficace, soit de 87% à 92% et le temps de sédimentation a peu d'effet.

Tableau 11 Efficacité de la récolte (%) en fonction du temps de traitement ECF et la période de décantation (Vandamme et al., 2011).

| Durée du traitement (min) | Période de sédimentation (min.) | | | |
|---------------------------|---------------------------------|----|----|----|
| | 0 | 10 | 20 | 30 |
| 10 | 16 | 19 | 19 | 32 |
| 20 | 87 | 88 | 91 | 91 |
| 30 | 88 | 89 | 92 | 91 |

3.8 Facteur énergie

En raison de leur petite taille (ex. 5 micromètres en moyenne pour *Chlorella sp.*) et la faible concentration moyenne de 1,4 g L⁻¹ pour la culture d'algue filamenteuse indigène et de 0,63 g L⁻¹ sur le Consortium VERTECH, la récolte d'algues microscopiques est un défi majeur.

Pour récolter 1 kg d'algues, il aurait fallu traiter 28,1 litres de ces cultures et utiliser 0,326 kWh en énergie électrique pour l'électrocoagulation, soit une facture de 1,2¢ d'électricité (selon les tarifs d'électricité en vigueur le 1^{er} avril 2016). En utilisant une anode d'aluminium dans un procédé Electrocoagulation–Floculation (EFC) sur l'espèce d'eau douce *Chlorella vulgaris*, un groupe de recherche (Vandamme et al., 2011) a récolté 1 kg de microalgues en utilisant 2 kWh d'énergie électrique. La plupart des systèmes existants de production de microalgues utilisent des centrifugeuses qui sont énergivores (Heasman et coll., 2000). Par conséquent, la récolte représente une fraction importante de la demande énergétique totale de la production (Grima et al., 2003; Uduman et al., 2010). Si les microalgues pourraient être pré-concentrées de 30 à 50 fois par électrocoagulation–floculation avant la centrifugation, la demande énergétique pour la récolte pourrait être fortement réduite (Vandamme et al., 2011).

Chapitre 4 - Conclusions

4.1 Variation du voltage en fonction du temps de traitement

Le voltage a atteint une asymptote après 15 minutes de traitement peu importe la concentration initiale de la culture au-delà d'une densité moyenne. Hors compte tenu que l'espacement des électrodes est fixe dans le réacteur et que l'intensité du courant induit a été ajusté à 10 ampères dans tous les tests; la récolte est donc optimale après 15 minutes de traitement.

4.2 Influence de la concentration des nutriments

La rareté des échantillons n'a pas permis de tirer de conclusion sur ce facteur. Les quelques observations portent à croire que l'effet serait négligeable.

4.3 Intégrité de la paroi cellulaire des algues

Sous le microscope, il apparaît clairement que le procédé d'électrocoagulation ne détériore pas la paroi cellulaire des microalgues de même que la membrane tubulaire des algues filamenteuses. En demeurant intact après le traitement d'électrocoagulation la biomasse récoltée est plus facilement densifiable par filtration ou par centrifugation.

4.4 Avantages et désavantages de l'électrocoagulation

L'analyse des résultats obtenus sur la récolte de la biomasse par la technologie d'électrocoagulation confirme ce qui se dégage des études récentes. Cette méthode électrochimique est économique, à faible consommation énergétique par rapport aux autres procédés et respectueuse de l'environnement. L'opération est facile et sécuritaire sans l'utilisation de produits chimiques coûteux et les ajustements fastidieux du pH (Mollah et al., 2004).

Le réacteur utilisé fonctionnait en 'batch' avec peu de capacité, il faudra encore développer des réacteurs qui opéreront en continu sur de grands volumes avant de passer à une production industrielle. L'encrassement des électrodes et la contamination des eaux résiduelles

et de la biomasse par les métaux de l'anode sacrificielle demeurent des éléments du système à améliorer. Le recyclage des eaux de procédé est essentiel à la faisabilité de cette méthode de production de produits biosourcés.

Tout compte fait, même jumelé à une deuxième phase de densification tel que la filtration et/ou la centrifugation, cette étude et la littérature sur l'électrocoagulation démontrent que ce procédé est efficace, économique et a le moins d'impact sur l'environnement.

4.5 Bilan économique

Les microalgues, comme matière première pour la production de biocarburants, suscitent depuis quelques années beaucoup d'intérêt, C'est en parti une réponse à l'instabilité des approvisionnements en pétrole, au changement climatique et à la diminution des réserves fossiles. Toutefois, la production de biocarburant à elle-seule n'est pas économiquement viable. La justification des investissements en infrastructures et des coûts d'opération passent par le développement de produits dérivés à grande valeur ajoutée. Les pigments, protéines, lipides, glucides, vitamines et antioxydants pour des applications dans les produits cosmétiques, alimentaires et pharmaceutiques sont des exemples de ces produits de grande valeur.

4.6 Perspectives

Suite à ce travail, les réflexions et les perspectives à moyen et long terme sont les suivantes :

- Valorisation du CO₂ et réduction nette des gaz à effet de serre : Le cycle du carbone de ce biocarburant est très intéressant ; la croissance des algues absorbe 2 tonnes de CO₂ par 300kg de carburant produit et la combustion de ce biocarburant n'émet qu'une tonne de dioxyde de carbone. Lorsque l'on considère les coûts énergétiques de production et la récupération nette du carbone nous arrivons à un gain d'environ 70% de réduction de gaz à effet de serre (Lam et Lee, 2013);
- Réduction des coûts d'opération en énergie et nutriments : Les coûts d'énergie pour la culture, la récolte et l'extraction des lipides algales représentent de 30 à 50% de

l'énergie produit en biobrut. L'utilisation des marées et des vagues pour le mixage de la culture, l'utilisation de nutriments marins et des eaux usées industrielles et municipales ainsi que la récupération des gaz et de la chaleur des usines avoisinantes pourraient réduire la facture de façon importante;

- Production de produits biosourcés : *Dunaliella* sp., largement utilisée pour la production de β -carotène à grande échelle (Graham et Wilcox, 2000), serait une souche intéressante à développer au Québec pour l'aquaculture, entre autres, compte tenu que c'est une souche indigène bien adaptée au milieu salin et aux basses température du Québec.
- Synergie avec les émetteurs de CO₂ : Développer le concept d'une bioraffinerie qui utiliserait les émissions de GES à la sortie d'une cimenterie comme source de CO₂ et d'énergie.

Bibliographie

- Abdelaziz, A.E.M., Liete, G.B., Hallenbeck, P.C (2013). Algal biofuels; challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, 145, 134–141.
- Barreiro, D. L., Samorì, C., Terranella, G., Hornung, U., Kruse, A., Prins, W. (2014). Assessing microalgae biorefinery routes for the production of biofuels via hydrothermal liquefaction. *Bioresource technology*, 174, 256-265.
- Beal, C. M., Hebner, R. E., Webber, M. E., Ruoff, R. S., Seibert, A. F. (2012). The energy return on investment for algal biocrude: results for a research production facility. *BioEnergy Research*, 5(2), 341-362.
- Bhatnagar, A., Bhatnagar, M., Chinnasamy, S., Das, K. C. (2010). Chlorella minutissima—a promising fuel alga for cultivation in municipal wastewaters. *Applied biochemistry and biotechnology*, 161(1-8), 523-536.
- Boëns, B., Pilon, G., Bourdeau, N., Gélinas, M., Adjallé, K., Barnabé, S. (2015, juin). *From basin to biocrude : full processing of grown-in-wastewaters biomasses using the RT-Algae process*. Communication présentée au 5th International Conference on Algal Biomass, Biofuels & Bioproducts, San Diego, États-Unis.
- Bourdeau, N., Bélanger-Lépine, F., Adjallé, K., Dubois-Caléro, N., Dosnon-Olette, R., Samson, G., Barnabé, S. (2017). Mixotrophic Cultivation of an Algae-Bacteria Consortium in Aluminium Smelter Wastewaters (Quebec, Canada): High Nitrogen Concentration Increases Overall Lipid Production. *Industrial Biotechnology*, 13(5), 260-269.
- Finley, M. (2013). *BP statistical review of world energy*. Récupéré de <http://www.bp.com>
- Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae—a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(2), 557-577.

Cadoret, J. P., & Bernard, O. (2008). La production de biocarburant lipidique avec des microalgues: promesses et défis. *Journal de la Société de Biologie*, 202(3), 201-211.

Cañizares, P., Martínez, F., Jiménez, C., Sáez, C., Rodrigo, M. A. (2009). Technical and economic comparison of conventional and electrochemical coagulation processes. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*, 84(5), 702-710.

Canfield, D.E., Ngombi-Pemba, L., Hammarlund, E.U., Bengtson, S., Chaussidon, M., Gauthier-Lafaye, F., Meunier, A., Riboulleau, A., Rollion-Bard, C., Rouxel, O., Asael, D., Pierson-Wickmann, A.-C., El Albani, A. (2013). Oxygen dynamics in the aftermath of the Great Oxidation of Earth's atmosphere. *PNAS*, 110(42), 16736-16741.

Chew, K. W., Yap, J. Y., Show, P. L., Suan, N. H., Juan, J. C., Ling, T. C., Chang, J. S. (2017). Microalgae biorefinery: high value products perspectives. *Bioresource technology*, 229, 53-62.

Christenson, L., & Sims, R. (2011). Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts. *Biotechnology advances*, 29(6), 686-702.

Crowe, B., Attalah, S., Agrawal, S., Waller, P., Ryan, R., Van Wageningen, J., Chavis, A., Kyndt, J., Karcira, M., Ogden, K.I., Huesemann, M. (2012). A comparison of Nannochloropsis salina growth performance in two outdoor pond designs: conventional raceways versus the ARID pond with superior temperature management. *International Journal of Chemical Engineering*, 2012. <http://dx.doi.org/10.1155/2012/920608>

Daghrir, R., Gherrou, A., Noel, I., & Seyhi, B. (2016). Hybrid process combining electrocoagulation, electroreduction, and ozonation processes for the treatment of grey wastewater in batch mode. *Journal of Environmental Engineering*, 142(5), 04016008.

Dassey, A. J., Theegala, C. S. (2013). Harvesting economics and strategies using centrifugation for cost effective separation of microalgae cells for biodiesel applications. *Bioresource technology*, 128, 241-245.

Ditomaso, J. M., Reaser, J. K., Dionigi, C. P., Doering, O. C., Chilton, E., Schardt, J. D., Barney, J. N. (2010). Biofuel vs bioinvasion: seeding policy priorities. *Environ. Sci. Technol.*, 44(18), 6906-6910.

DOE (2010). National Alliance for Advanced Biofuels and Bioproducts Synopsis (NAABB) Final Report. Récupéré de <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/downloads/national-alliance-advanced-biofuels-and-bioproducts-synopsis-naabb-final>

DOE (2013). *New investments to accelerate next generation biofuels 2013*. Récupéré de <https://www.energy.gov/articles/energy-department-announces-new-investment-accelerate-next-generation-biofuels>

Elliott, D. C., Biller, P., Ross, A. B., Schmidt, A. J., Jones, S. B. (2015). Hydrothermal liquefaction of biomass: developments from batch to continuous process. *Bioresource technology*, 178, 147-156.

Fang, S. C. (2014). Metabolic engineering and molecular biotechnology of microalgae for fuel production [chapitre de livre]. Dans Pandey, A., Lee, D. J., Chisti, Y., Soccol, C. R. (éds), *Biofuels from Algae* (pp. 47-65). Newnes.

Ferrell, J., Sarisky-Reed, V. (2010). *National algal biofuels technology roadmap*. Récupéré de <https://www.osti.gov/biblio/1218560>

Goldenberg, S. (2010). *Algae to solve the Pentagon's jet fuel problem*. Récupéré de <https://www.theguardian.com/environment/2010/feb/13/algae-solve-pentagon-fuel-problem>

Gouveia, L. (2011). Microalgae as a Feedstock for Biofuels [chapitre de livre]. Dans Gouveia, L., *Microalgae as a Feedstock for Biofuels* (pp. 1-69). Springer.

Jorquera, O., Kiperstok, A., Sales, E. A., Embirucu, M., Ghirardi, M. L. (2010). Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors. *Bioresource technology*, 101(4), 1406-1413.

- Kim, J., Lee, J. Y., Lu, T. (2015). A model for autotrophic growth of *Chlorella vulgaris* under photolimitation and photoinhibition in cylindrical photobioreactor. *Biochemical engineering journal*, 99, 55-60.
- Koopman, B., Lincoln, E. P. (1983). Autoflotation harvesting of algae from high-rate pond effluents. *Agricultural Wastes*, 5(4), 231-246.
- Lam, M. K., & Lee, K. T. (2013). Effect of carbon source towards the growth of *Chlorella vulgaris* for CO₂ bio-mitigation and biodiesel production. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 14, 169-176.
- Lavoie, J. M., Marie-Rose, S., & Lynch, D. (2013). Non-homogeneous residual feedstocks to biofuels and chemicals via the methanol route. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 3(1), 39-44.
- Soh, L., Montazeri, M., Haznedaroglu, B. Z., Kelly, C., Peccia, J., Eckelman, M. J., Zimmerman, J. B. (2014). Evaluating microalgal integrated biorefinery schemes: empirical controlled growth studies and life cycle assessment. *Bioresource technology*, 151, 19-27.
- Liu, Z., Chen, F. (2014). Heterotrophic Production of Algal Dils [chapitre de livre]. Dans Pandey, A., Lee, D. J., Chisti, Y., Soccol, C. R. (éds), *Biofuels from Algae* (pp, 111-142). Elsevier.
- McGinn, P. J., Dickinson, K. E., Bhatti, S., Frigon, J. C., Guiot, S. R., & O'Leary, S. J. (2011). Integration of microalgae cultivation with industrial waste remediation for biofuel and bioenergy production: opportunities and limitations. *Photosynthesis research*, 109(1-3), 231-247.
- Milledge, J. J., Heaven, S. (2013). A review of the harvesting of micro-algae for biofuel production. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 12(2), 165-178.
- Grima, E. M., Belarbi, E. H., Fernández, F. A., Medina, A. R., Chisti, Y. (2003). Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnology advances*, 20(7-8), 491-515.

- Mollah, M. Y., Morkovsky, P., Gomes, J. A., Kesmez, M., Parga, J., Cocke, D. L. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of hazardous materials*, 114(1-3), 199-210.
- Praveenkumar, R., Shameera, K., Mahalakshmi, G., Akbarsha, M. A., Thajuddin, N. (2012). Influence of nutrient deprivations on lipid accumulation in a dominant indigenous microalga *Chlorella* sp., BUM11008: evaluation for biodiesel production. *Biomass and bioenergy*, 37, 60-66.
- Quinn, J. C., & Davis, R. (2015). The potentials and challenges of algae based biofuels: a review of the techno-economic, life cycle, and resource assessment modeling. *Bioresource technology*, 184, 444-452.
- Sarkar, O., Agarwal, M., Kumar, A. N., & Mohan, S. V. (2015). Retrofitting heterotrophically cultivated algae biomass as pyrolytic feedstock for biogas, bio-char and bio-oil production encompassing biorefinery. *Bioresource technology*, 178, 132-138.
- Scott, S. A., Davey, M. P., Dennis, J. S., Horst, I., Howe, C. J., Lea-Smith, D. J., & Smith, A. G. (2010). Biodiesel from algae: challenges and prospects. *Current opinion in biotechnology*, 21(3), 277-286.
- Uduman, N., Qi, Y., Danquah, M. K., Forde, G. M., Hoadley, A. (2010). Dewatering of microalgal cultures: a major bottleneck to algae-based fuels. *Journal of renewable and sustainable energy*, 2(1), 012701.
- Vandamme, D., Pontes, S. C. V., Goiris, K., Foubert, I., Pinoy, L. J. J., Muylaert, K. (2011). Evaluation of electro-coagulation–flocculation for harvesting marine and freshwater microalgae. *Biotechnology and bioengineering*, 108(10), 2320-2329.
- Williams, P. J. L. B., Laurens, L. M. (2010). Microalgae as biodiesel & biomass feedstocks: review & analysis of the biochemistry, energetics & economics. *Energy & Environmental Science*, 3(5), 554-590.

Yen, H. W., Hu, I. C., Chen, C. Y., Ho, S. H., Lee, D. J., Chang, J. S. (2013). Microalgae-based biorefinery—from biofuels to natural products. *Bioresource technology*, 135, 166-174.

Annexe I

À propos de la souche VERTECH et de son milieu de culture

La production de la biomasse algale est issue d'un consortium d'algues-bactéries majoritairement composé de *Chorella sp*, cultivée dans les eaux usées industrielles de quatre industries de la région de Victoriaville.

Parmalat Canada Inc, produit du lait et des produits laitiers, des jus de fruits, des produits de culture, des fromages et des tartinades. L'usine cohabite avec le Groupe Canlac Inc,, une division de la pharmaceutique Abbott Laboratoire inc. Les résidus de l'usine Parmalat obtenus après l'extraction des protéines et des matières grasses du lait, le perméat, riche en lactose contribuent à 45% des intrants. Canlac inc, fournit aussi 45%, ses résidus industriels communs après neutralisation et le perméat de lactosérum issu du décanteur de lactose se retrouvent dans le substrat.

L'entreprise Sani Marc Inc, fabrique et distribue des produits d'assainissement dans les secteurs agroalimentaires et sanitaires. Ses effluents se composent de divers produits chimiques, tels que des acides, des bases et des désinfectants.

Gesterra inc, est une entreprise de gestion de matières résiduelles collectant des rejets industriels, municipaux, institutionnels et commerciaux. Elle opère un lieu d'enfouissement technique (LET) ; les eaux de lixiviation récupérées sont un intrant à la culture des algues. Selon le type de déchet enfoui, la composition varie beaucoup mais on y trouve souvent des produits azotés, des dérivés de phosphore et des métaux. Les paramètres à considérer sont, entre autres, le pH, la conductivité, la DBO₅ et la DCO. La nature toxique de ces effluents ajoute à la valeur de ces intrants dans la mesure qu'elle protège contre la prolifération d'espèces invasives de microalgues et autres microorganismes non souhaitables. Sani Marc Inc, ajoute 8% et Gesterra Inc, 2% au substrat de culture des microalgues. Les résidus industriels sont collectés dans un bassin d'homogénéisation dans lequel se retrouvent, à 90% les effluents de Parmalat-Lactantia et du Groupe Canlac – Abbott Laboratories riches en lactose.